

**ESTIMACIÓN DEL CRECIMIENTO, LA BIOMASA Y LA CAPTURA
DE CARBONO DE TRES ESPECIES ARBÓREAS DEL BOSQUE
URBANO EN LOS MUNICIPIOS DE MEDELLÍN Y ENVIGADO**

ANDRÉS RODRÍGUEZ HURTADO

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Ambiental**

Directora:

MARÍA DEL PILAR ARROYAVE MAYA

Ingeniera Forestal, M.Sc.



**UNIVERSIDAD EIA
INGENIERÍA AMBIENTAL
ENVIGADO
2018**

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Dedicado a quienes persiguen sus sueños y a todos aquellos que dedican su vida al servicio de los demás sin esperar reconocimiento alguno. Gracias a ellos aún conservo la esperanza en vosotros.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, a mi familia y a todos aquellos que le han dado significado a mi vida. Gracias por creer en mí, por sus grandes esfuerzos para permitirme cumplir mis sueños y por ese amor incondicional que me acompañará siempre. Agradezco también a mi directora de trabajo de grado María del Pilar Arroyave por su gran apoyo durante esta investigación y a lo largo de mi formación profesional, y finalmente a todos los empleados de la Universidad EIA por su gran carisma y vocación de servicio.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	11
1 PRELIMINARES	12
1.1 Planteamiento del problema	12
1.2 Objetivos del proyecto.....	13
1.2.1 Objetivo general	13
1.2.2 Objetivos Específicos.....	13
1.3 Marco de referencia	13
1.3.1 Antecedentes	13
1.3.2 Marco teórico.....	17
2 METODOLOGÍA	22
2.1 Obtención de los valores de las variables dendrométricas	22
2.1.1 Selección de especies	22
2.1.2 Selección de árboles.....	23
2.1.3 Mediciones en campo	24
2.2 Estimación del crecimiento en diámetro	25
2.2.1 Cálculo de crecimiento.....	25
2.2.2 Comparación entre las especies	25
2.3 Estimación de la biomasa total	25
2.4 Estimación de la captura y almacenamiento de carbono de las tres especies y el valor económico asociado.....	26

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

2.4.1	Cálculo del carbono	26
2.4.2	Estimación del valor económico	26
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	27
3.1	Variables dendrométricas	27
3.2	Estimación del crecimiento diamétrico.....	27
3.2.1	Incremento medio anual (IMA)	27
3.2.2	Comparación entre las especies	30
3.3	Estimación de biomasa	31
3.3.1	Comparación del crecimiento en biomasa entre las especies.....	33
3.4	Captura y almacenamiento de carbono	36
3.4.1	Comparación entre especies	37
3.4.2	Estimación valor económico	38
4	CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES	40
	REFERENCIAS.....	42
	ANEXOS	46

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Modelos predictivos de biomasa para bosques húmedos.....	14
Tabla 2. Ecuaciones de biomasa por rangos de tamaño.....	19
Tabla 3. Preselección de especies	23
Tabla 4. Especies de estudio.....	23
Tabla 5. Clases diamétricas por especie.....	24
Tabla 6. Valores medios y desviación estándar () de las tres especies para cada periodo de muestreo	27
Tabla 7. Incremento medio anual (IMA) y desviación estándar () de las tres especies.....	28
Tabla 8. Prueba estadística Kruskal-Wallis. Intervalos de confianza del 95,0%.....	30
Tabla 9. Incremento medio en biomasa total y desviación estándar () por especie	32
Tabla 10. Prueba estadística de Múltiples rangos para Biomasa. Intervalos de confianza del 95,0%	34
Tabla 11. Método LSD 95%.....	35
Tabla 12. Captura de carbono y desviación estándar () de las especies.....	36
Tabla 13. Captura y almacenamiento de carbono en la zona urbana del Valle de Aburrá	39

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Comparación de crecimiento en DAP entre especies	28
Figura 2. IMA para cada clase diamétrica de <i>B. picta</i>	29
Figura 3. IMA para cada clase diamétrica de <i>H. chrysanthus</i>	29
Figura 4. IMA para cada clase diamétrica de <i>E. fusca</i>	30
Figura 5. Gráfico de medianas. Método Kruskal – Wallis	31
Figura 6. Incremento medio en Bt por clase diamétrica para <i>B. picta</i>	32
Figura 7. Incremento medio en Bt por clase diamétrica para <i>H. chrysanthus</i>	33
Figura 8. Incremento medio en Bt por clase diamétrica para <i>E. fusca</i>	33
Figura 9. Comparación del incremento en biomasa de las tres especies	34
Figura 10. Estimación de la biomasa con los cinco modelos para <i>E. fusca</i>	35
Figura 11. Captura media de carbono para cada clase diamétrica de <i>B. picta</i>	36
Figura 12. Captura media de carbono para cada clase diamétrica de <i>H. chrysanthus</i>	37
Figura 13. Captura media de carbono para cada clase diamétrica de <i>B. picta</i>	37
Figura 14. Captura media de carbono e intervalo de confianza para cada especie	38

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo 1. Formato de datos.....	46
Anexo 2. Especies SAU.....	47
Anexo 3. Información general del búcaro.....	47
Anexo 4. Información general del guayacán amarillo	48
Anexo 5. Información general del casco de vaca	49
Anexo 6. Mapa de individuos seleccionados	50
Anexo 7. Mediciones en campo - Erythrina fusca.....	51
Anexo 8. Mediciones en campo - Handroanthus chrysanthus	52
Anexo 9. Mediciones en campo - Bauhinia picta	53

RESUMEN

En el presente estudio, llevado a cabo durante nueve meses en la zona urbana de los municipios de Medellín y Envigado, se estimó el crecimiento en diámetro, la biomasa total y la captura de carbono de 60 individuos arbóreos, que corresponden a las especies *Bauhinia picta*, *Handroanthus chrysanthus* y *Erythrina fusca*, clasificadas a su vez en tres grupos funcionales que se definieron en base a la densidad de la madera (ρ) reportada en la literatura. Adicionalmente, se realizaron comparaciones entre especies mediante un análisis de varianza, con el propósito de identificar si existían diferencias significativas entre ellas. Finalmente se determinó el valor económico asociado a la captura de carbono de cada una de las especies en la zona urbana del Valle de Aburrá.

De acuerdo con los resultados obtenidos, *B. picta* reportó los valores más altos en las tasas de crecimiento en diámetro, aumento en biomasa y captura media de carbono, seguido de *H. chrysanthus* y por último, *E. fusca* quién obtuvo las tasas más bajas. También se encontraron diferencias significativas entre especies, lo cual se esperaba a lo largo de los gradientes sucesionales. Asimismo, se encontró una tendencia al aumento en biomasa total de las especies clasificadas como tolerantes, es decir aquellas con mayor densidad de la madera.

El valor económico asociado a la captura de carbono de las tres especies en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá fue de \$ COP 276.120,856 al año, lo cual resalta la importancia de continuar avanzando en el conocimiento del bosque urbano, con el propósito de establecer estrategias de manejo y conservación más acertadas que contribuyan positivamente al funcionamiento global de los ecosistemas y garantizar su sostenibilidad ambiental y financiera.

ABSTRACT

In the present study, carried out during nine months in the urban area of the municipalities of Medellín and Envigado, it was estimated the growth in diameter, total biomass and carbon capture of 60 arboreal individuals, corresponding to the *Bauhinia picta*, *Handroanthus chrysanthus* and *Erythrina fusca* species. These were classified in turn into three functional groups that were defined based on the wood density (ρ) reported in the literature. Additionally, comparisons were made between species through an analysis of variance, with the purpose of identifying if there were significant differences between them. Finally, the economic value associated with the carbon capture of each of the species in the urban area of the Aburrá Valley was determined.

According to the results obtained, *B. picta* reported the highest values in the growth rates in diameter, increase in biomass and average carbon capture, followed by *H. chrysanthus* and finally, *E. fusca* who obtained the lowest rates. Significant differences between species were also found, which was expected along the successional gradients. Likewise, there was a tendency to increase the total biomass of the species classified as tolerant, which mean, those with the highest wood density.

The economic value associated with the carbon capture of the three species in the Metropolitan Area of the Aburrá Valley was \$ COP 276.120,856 per year. This highlights the importance of continuing to advance in the knowledge of the urban forest, with the purpose of establish more accurate management and conservation strategies that contribute positively to the global functioning of ecosystems and guarantee their environmental and financial sustainability.

INTRODUCCIÓN

El bosque urbano se consolida como un elemento estructurante del territorio dado que contribuye al bienestar de la sociedad, mejorando su calidad de vida a través de los servicios ecosistémicos que ofrece, directos e indirectos, como la remoción de contaminantes atmosféricos y de carbono, la belleza escénica, el incremento del valor patrimonial, la disminución de fatiga mental, el mantenimiento del equilibrio ecológico, entre otros. Sin embargo, la falta de conocimiento acerca del comportamiento de las especies arbóreas en el contexto urbano limita su aprovechamiento óptimo. Es importante contar con la información de la ecología de las especies, como por ejemplo su crecimiento, con el fin de diseñar estrategias de manejo y conservación más acertadas, que optimicen los servicios que presta el bosque urbano, de tal manera que contribuyan a mitigar los efectos del cambio climático, entre otros.

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá reconoce la importancia del arbolado urbano dentro del modelo de ciudad proyectado, dado que se constituye como eje articulador de la estructura ecológica principal, es decir, garantiza la continuidad de los procesos ecológicos esenciales para el funcionamiento de los ecosistemas y a su vez, la prestación de servicios a la comunidad (AMVA, 2014). A partir de esto, se han desarrollado instrumentos de planificación y gestión ambiental urbana en la región, que finalmente, requieren mayor participación y compromiso por parte de los actores involucrados para lograr un territorio más equilibrado y sostenible (AMVA & UPB, 2015).

El documento consta de cuatro partes: 1) la medición en campo de las variables dendrométricas para cada uno de los individuos arbóreos seleccionados en los municipios de Medellín y Envigado, 2) la comparación del crecimiento de las tres especies de estudio, con el fin de validar si existen diferencias significativas entre ellas, 3) la estimación de la biomasa aérea total, mediante el uso de ecuaciones alométricas reportadas en la literatura para la zona de estudio y por último 4) la estimación de la captura y almacenamiento de carbono de las tres especies en el Valle de Aburrá, con su respectivo valor económico asociado.

Esta investigación representa un aporte al entendimiento y construcción de una línea base acerca del comportamiento, desarrollo y funcionamiento de las zonas verdes urbanas, facilitando el diseño de políticas y estrategias de gestión, cuyo objetivo sea la obtención de incentivos económicos para la conservación del bosque, mediante los esquemas de pago por servicios ambientales.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

1 PRELIMINARES

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Valle de Aburrá ha sufrido una serie de transformaciones en el uso del suelo por la expansión urbana y el desarrollo de obras de infraestructura principalmente. Esto genera grandes impactos en el ambiente y en la calidad de vida de la población, como el deterioro y desaparición de la cobertura vegetal, cambios en el microclima, destrucción de hábitats y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), donde se ha determinado que el dióxido de carbono (CO₂) es el contaminante más liberado a la atmósfera (Schlegel, 2001; AMVA, UNAL, Cornare, & CORANTIOQUIA, 2005; Daniels et al., 2007). Además, el crecimiento en los últimos años del sector automotriz contribuye al detrimento de la calidad del aire en la ciudad, afectando desfavorablemente la salud y el bienestar de sus habitantes (Bedoya & Martínez, 2009).

El arbolado urbano constituye un recurso invaluable dentro de la ciudad, debido a su influencia directa e indirecta sobre el bienestar y la calidad de vida de las personas (Valenzuela, 2005; AMVA, 2006). Además de su aprovechamiento para contrarrestar los efectos del cambio climático por medio del almacenamiento de CO₂ atmosférico en su estructura leñosa, logrando reducir las concentraciones de este gas, que en los últimos 100 años ha tenido un incremento considerable, puesto que pasó de 280 partes por millón (ppm) de CO₂ antes de la Revolución Industrial hasta aproximadamente 400 ppm en la actualidad (Corporación Ambiental Empresarial Fundación NATURA, 2014; Ludeña, de Miguel, & Schuschny, 2015).

El municipio de Medellín reconoce la importancia de la silvicultura urbana y ha contribuido al desarrollo de nuevos viveros comunitarios, además de la difusión del conocimiento a través de manuales y guías que proporcionan información morfológica, ecológica y paisajística de más de cincuenta especies; así como la creación en el año 2011 del aplicativo Sistema del Árbol Urbano (SAU) donde se realiza seguimiento continuo a más de 117 mil individuos arbóreos, reportando su estado general (Alcaldía de Medellín, 2011; Pérez, 2015). Sin embargo, la poca información disponible acerca del crecimiento y comportamiento de estas especies en un entorno tan cambiante como el urbano, limita su aprovechamiento óptimo para la captura de carbono, y en general, de todos los servicios ecosistémicos que ofrecen a la población (Gamarra, 2001; Corporación Ambiental Empresarial Fundación NATURA, 2014; Universidad Nacional de Colombia & AMVA, 2015).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Por lo tanto, en este estudio se identificaron tres especies nativas (*Erythrina fusca*, *Handroanthus chrysanthus* y *Bauhinia picta*), clasificadas a su vez en diferentes grupos sucesionales y ubicadas dentro de la zona urbana de los municipios de Medellín y Envigado, con el propósito de analizar su crecimiento en diámetro y aportar a la construcción de una línea base acerca de las especies arbóreas sometidas a factores continuos de estrés y las diferencias adaptativas entre ellas. Adicionalmente, la estimación de biomasa y almacenamiento de carbono incentivan el desarrollo de estrategias ambientales que tengan como objetivo la obtención de beneficios económicos por la conservación del bosque y la reducción de las emisiones de GEI, dado que los valores de captura de carbono que se estiman a partir del crecimiento, se pueden utilizar en los esquemas de pago por servicios ambientales dentro de la ciudad bajo el modelo de responsabilidad ambiental empresarial.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.2.1 Objetivo general

Estimar el crecimiento, la biomasa y la captura de carbono de tres especies arbóreas del bosque urbano en los municipios de Medellín y Envigado.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar los valores de las variables dendrométricas.
- Comparar el crecimiento de las tres especies de estudio.
- Estimar la biomasa total, mediante el uso de ecuaciones alométricas.
- Estimar la captura y almacenamiento de carbono de las tres especies de estudio, y el valor económico asociado.

1.3 MARCO DE REFERENCIA

1.3.1 Antecedentes

Las zonas verdes se han consolidado como un elemento residual en el desarrollo de infraestructura y crecimiento urbano de la ciudad, debido en parte a la falta de conocimiento e información disponible; por lo tanto, es necesario darle mayor valor al bosque urbano y promover su manejo adecuado, aprovechamiento y conservación, que a su vez contribuye al bienestar y calidad de vida de sus ciudadanos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

En la investigación desarrollada por Monteiro, Levnic, & Doick (2017) se estudió el crecimiento en diámetro y altura de cuatro especies arbóreas (*Acer pseudoplatanus*, *Betula pendula*, *Fraxinus excelsior* y *Quercus robur*) predominantes en la zona urbana de cinco ciudades de Gran Bretaña para evaluar los servicios ecológicos que proporcionan a las comunidades. Se escogieron 517 árboles, distribuidos en dos clases diamétricas, con un promedio de 23 individuos por especie en cada ciudad. Mediante un análisis dendrocronológico se identificó la edad y las condiciones climáticas a las que estuvieron sometidos, además de realizar mediciones en campo que permitieron determinar un crecimiento medio anual entre 0,75 y 1,49 cm en DAP y entre 0,59 y 1,19 cm en altura. Finalmente, se pudo concluir que la cantidad de servicios ecosistémicos proporcionados por los espacios verdes urbanos, como la reducción del efecto isla de calor; la atenuación de inundaciones y el mejoramiento de la calidad del aire, gracias al secuestro y almacenamiento de carbono, dependen del tamaño y el estado fitosanitario del individuo; además se sugiere que el crecimiento de estas especies es muy sensible a las variaciones de precipitación y temperatura.

En otro estudio realizado por Chou & Gutiérrez (2012) se analizó el comportamiento de las variables dasométricas en dos bosques tropicales de Costa Rica: Península de Osa, Parque Nacional Corcovado, Estación Sirena y Caribe Sur, Talamanca; con el propósito de establecer un modelo que permita estimar indirectamente la biomasa almacenada en los bosques tropicales de la región, dada su capacidad de mitigar los efectos del cambio climático. Para lograr el objetivo, se evaluaron 907 árboles con DAP mayor a 10 centímetros, además se realizó una revisión bibliográfica que permitió identificar cuatro modelos predictivos de biomasa, presentados en la Tabla 1, y datos sobre la densidad de la madera de las especies de análisis.

Tabla 1. Modelos predictivos de biomasa para bosques húmedos

Modelo	Ecuación
1	$B_1 = d * e^{(-1,239+1,980*\ln(DAP)+0,207*[\ln(DAP)]^2-0,0281*[\ln(DAP)]^3)}$
2	$B_2 = e^{(-2,557+0,94*\ln(d*DAP^2*ht))}$
3	$B_3 = 21,297 - 6,953 * (DAP) + 0,740 * (DAP)^2$
4	$B_4 = 0,06 * d * \frac{\pi * DAP^2}{4} * ht$

Fuente: elaboración propia con datos de Chou & Gutiérrez (2012).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Nota: B= biomasa aérea (kg), DAP= diámetro a la altura del pecho (cm), d= peso específico básico (g/cm³), ht = altura total (m)

A partir de los modelos encontrados en la literatura, se desarrolló el modelo final que permite estimar la biomasa aérea y solo utiliza el DAP y la densidad de la madera como variables independientes, descartando la altura total, como se describe a continuación:

$$(B^2)^{1/5} = \beta_0 + \beta_1 * dap + \beta_2 * dap * d + \beta_3 * (dap - 50) * X$$

Donde: $\beta_0 = 0,1438$; $\beta_1 = 0,2051$; $\beta_2 = 0,3216$; $\beta_3 = -0,0744$ y X = variable dicotómica (1 si dap \geq 50 cm y 0 si dap < 50 cm)

Los resultados obtenidos estiman que el bosque primario en Sirena tiene una biomasa de 241,15 ton/ha, mientras que el bosque secundario en este mismo sitio es de 142,37 ton/ha y para el bosque intervenido en Talamanca es de 181,59 ton/ha. El estudio propone además un enfoque metodológico para estimar la biomasa a nivel general en los bosques tropicales, lo cual facilita la toma de decisiones sobre el almacenamiento y la captura en el largo plazo del carbono.

Complementario a este estudio, Ramírez, Mendizábal, & Alba (2012) desarrollaron una investigación para determinar la cantidad de carbono que puede ser capturada y almacenada en una plantación de la especie *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis* en el Valle de Perote, Estado de Veracruz, México, dada su capacidad para soportar condiciones extremas de temperatura, luz y precipitación. Mediante la evaluación de 479 individuos arbóreos, registrando el diámetro en la base del tronco y la altura, se calculó el volumen de cada árbol utilizando la siguiente ecuación, desarrollada por Pardé, Bouchon, & Philip (1994, citado en Ramírez et al., 2012):

$$V = AB * H * Cf$$
$$AB = \pi/4 * D^2$$

Donde:

V= Volumen en m³

AB = Área Basal en m²

H = Altura en m

Cf = Coeficiente de forma (0.5)

$\pi/4$ = Constante 0.7854

D = Diámetro a la base del tronco en m

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Posteriormente, se estimó la biomasa aérea, multiplicando el volumen de cada individuo por la densidad de la madera y finalmente se calculó el contenido de carbono almacenado, multiplicando la biomasa encontrada por el factor de contenido de carbono (0.45). Los resultados muestran que la especie *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis* almacena en una superficie de 2945 m² un total de 2126,90 kg de C y se estima que la biomasa aérea puede almacenar 7,22 toneladas de carbono cada año, lo cual es de gran importancia para los mecanismos de reforestación y plantaciones en el país.

Por otro lado, en la investigación desarrollada por Giraldo, Cárdenas, & Duque (2011) sobre el crecimiento de seis especies arbóreas en un bosque de tierra firme en la Amazonia, se evaluó la variación alométrica entre variables dendrométricas y el crecimiento en DAP y biomasa de las especies de estudio clasificadas en tres grupos funcionales. Para la selección de las especies se tuvo como criterio la abundancia dentro de la parcela y que representaran los grupos funcionales dentro de la comunidad. Con base en estos criterios se escogieron: *Eschweilera rufifolia*, *Eschweilera itayensis*, *Conceveiba guianensis*, *Otoba parvifolia*, *Pseudolmedia laevis* y *Apeiba aspera*.

Se evaluaron 150 individuos con DAP > 10 cm, distribuidos en siete clases diamétricas. A cada árbol se le registraron las variables dendrométricas: altura total (H), diámetro a la altura del pecho (DAP), diámetro de copa (DC) y la densidad de la madera (ρ), que se obtuvo a través de revisión bibliográfica. Luego de esto, conociendo la densidad (ρ) se hizo una clasificación por grupos funcionales, de la siguiente manera:

0.3 – 0.5 g/cm³ pioneras tempranas

0.51 – 0.7 g/cm³ pioneras tardías

$\rho > 0.71$ g/cm³ tolerantes

Para el cálculo del crecimiento, definido como el cambio en el DAP, dividido por el tiempo en años, se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Crecimiento (mm/año)} = \left(\frac{dap_1 - dap_0}{\text{años}} \right)$$

Donde años: #días/365

Para el cálculo de la biomasa se utilizó la ecuación desarrollada por Chave et ál. (2005, citado en Giraldo et al., 2011) que relaciona el DAP, la densidad y la altura total:

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

$$(ABG)_{stand} = p * EXP(-1,239 + 1,980 * \ln(dap) + 0,207 * (\ln(DAP))^2 - 0,0281 * (\ln(dap))^3)$$

A partir de los resultados encontrados, se evaluaron las diferencias en las tasas de crecimiento promedio anual en DAP entre especies y grupos funcionales. Sin embargo, no se reportaron diferencias en los patrones de crecimiento diametral entre grupos funcionales en este bosque y se pudo concluir que el DAP es la variable estructural explicatoria más importante, además de identificar una tendencia a mayor crecimiento diamétrico de especies pioneras tempranas y tendencia al aumento en biomasa en las especies tolerantes. Finalmente, se resalta la importancia de entender el funcionamiento de los bosques, en relación con su crecimiento para comprender los efectos del cambio climático sobre la dinámica del carbono en los bosques tropicales.

En otros estudios se han determinado las tasas de crecimiento para especies utilizadas comúnmente en la arborización del Valle de Aburrá. Por ejemplo, para la acacia amarilla (*Caesalpinia pluviosa*) Cruz et al. (2004) reportaron un crecimiento en DAP de 3 mm/año. Para el guayacán rosado (*Tabebuia rosea*), Pineda, Valdez, & Pérez (2016) reportaron un crecimiento de 6 mm/año. Y para la ceiba (*Ceiba pentandra*), Román et al., (2005) reportaron 9 mm de crecimiento. Sin embargo, los estudios de crecimiento de las especies arbóreas reportados en la literatura corresponden principalmente a ecosistemas naturales o a plantaciones forestales; para el ambiente urbano existen muchos vacíos de conocimiento.

1.3.2 Marco teórico

A continuación, se definen los principales conceptos relacionados con las variables dendrométricas, el crecimiento de las especies y la determinación de la biomasa y la captura de carbono.

1.3.2.1 Variables dendrométricas

El elemento básico para la medición forestal es el árbol individual, por lo tanto, resulta importante considerar las variables que se proporcionan a continuación:

- DAP (cm): es el diámetro a la altura del pecho medido a 1,30 metros de la base del árbol. En campo se mide la circunferencia a la altura del pecho (CAP) en centímetros y luego se convierte a DAP dividiendo el valor por π .

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Altura DAP (m): se registra en caso de presentarse irregularidades en el tallo como ramas, abultamientos y bifurcaciones que obliguen a tomar la medida a una altura diferente. El árbol puede tener varios tallos, por lo que se deben medir hasta seis DAP.
- Altura total (m): es la altura medida desde la base del árbol hasta la rama más alta.
- Altura a la copa viva (m): es la altura medida desde la base del árbol hasta la rama más alta que esté viva. Coincide con la altura total si el árbol no tiene ramas terminales secas o muertas.
- Altura a la base de la copa (m): es la altura medida desde la base del árbol hasta donde inician las primeras hojas de la copa. No se consideran los retoños en el tallo.
- Amplitud de la copa N-S (m): corresponde al diámetro de la copa en la dirección Norte-Sur. Se mide con cinta métrica.
- Amplitud de la copa E-W (m): corresponde al diámetro de la copa en la dirección Este-Oeste. Se mide con cinta métrica.
- Porcentaje de muerte de copa (%): es el porcentaje de la copa que presenta ramas secas o muertas. Esto permite determinar el estado de salud de los individuos.

1.3.2.2 Crecimiento

El incremento de la masa forestal está influenciado por su capacidad genética e interacción con los factores climáticos, edáficos, competitivos, entre otras características de cada región (Lema, 1979). En términos generales, el crecimiento de un individuo arbóreo se mide como el incremento en el diámetro, puesto que el diámetro a la altura del pecho (DAP) es considerado como el mejor indicador de la biomasa de un árbol y es importante determinarlo porque influye en la biomasa acumulada, así como en la captura de carbono (Mora, Angulo, & Lezama, 2009; Giraldo et al., 2011). Sin embargo, debe aclararse que el crecimiento en altura es muy importante en las especies pioneras.

Lema (1979) señala que en la literatura existen varios métodos para estudiar el crecimiento, cuya diferencia es mínima y se consideran periodos de tiempo que van desde un día hasta una década o siglo, como se presenta a continuación:

- Incremento corriente anual: es la diferencia entre las medidas tomadas al inicio y finalización de un año en particular.
- Incremento anual periódico: es el promedio anual para un periodo de años.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Incremento periódico: es el incremento ocurrido entre los años extremos de un periodo.
- Incremento medio anual: es el promedio anual para una edad determinada. Se calcula dividiendo el tamaño total acumulado por la edad.

1.3.2.3 Estimación de la biomasa

La biomasa de un individuo arbóreo se define como su masa seca total, incluyendo el follaje, ramas, troncos y raíces, sin considerar la hojarasca caída y la materia orgánica en descomposición (Whitmore, 1975 citado en Orrego, del Valle, & Moreno, 2003). En general, existen dos métodos para estimar la biomasa aérea de un bosque: el método directo o destructivo, en el cual se talan varios individuos para pesar la biomasa directamente secando la madera. El método indirecto estima la biomasa usando modelos de regresión a partir de información obtenida en campo, en inventarios forestales e información de imágenes satelitales (Orrego et al., 2003; Brown, 1997 citado en Chou & Gutiérrez, 2012).

En el contexto mundial existen varias ecuaciones para estimar la biomasa total de los bosques. Sin embargo, deben considerarse las limitaciones existentes al momento de usarlas, debido en gran medida, a la heterogeneidad de las especies en los bosques tropicales (Acosta M., Vargas H., Velázquez M., & Etchevers B., 2000; Mora, Angulo, & Lezama, 2009; Pamplona, & Giraldo, 2011). Por lo tanto, debe consultarse previamente la ecuación de biomasa que más se adecúe al contexto específico de cada zona.

Mediante una revisión bibliográfica se encontraron ecuaciones alométricas para árboles tropicales, como el estudio realizado en los bosques primarios intervenidos y secundarios de la cuenca media del río Porce, donde convergen algunos modelos estadísticos para estimar la biomasa total del árbol y sus componentes (Orrego et al., 2003). A continuación, se presentan las ecuaciones de biomasa encontradas en las investigaciones que pueden ser aplicadas para el bosque urbano de los municipios de Medellín y Envigado.

1.3.2.3.1 Ecuaciones de biomasa por rangos de tamaño

En la Tabla 2 se presentan algunos modelos que permiten estimar la biomasa como función del diámetro, en las clases de tamaño propuestas.

Tabla 2. Ecuaciones de biomasa por rangos de tamaño.

Rango (cm)	Modelo
<10	$\ln(Bt) = -2,070 + 2,328 * \ln(D)$

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Rango (cm)	Modelo
10-40	$\ln(Bt) = -2,432 + 2,516 * \ln(D)$
40-100	$\ln(Bt) = -1,794 + 2,421 * \ln(D)$
40-200	$\ln(Bt) = -5,132 + 3,483 * \ln(D)$

Fuente: tomada de Orrego et al. (2003).

1.3.2.3.2 Ecuación de Brown

En el estudio realizado en las zonas rurales del municipio de Medellín para determinar el contenido de carbono presente en la cobertura denominada pastos arbolados, se empleó la ecuación de biomasa aérea desarrollada por Brown (1997 citado en Alcaldía de Medellín, 2014):

$$\ln(Bt) = -2,289 + 2,649 * \ln(dap) - 0,021 * \ln(dap)$$

Donde, Bt es la biomasa aérea medida en kg/árbol y DAP es el diámetro promedio en cm.

1.3.2.3.3 Ecuación de densidad

De acuerdo con Álvarez, Benítez, Velásquez, & Cogollo (2013) la densidad de la madera es una variable que está fuertemente relacionada con la historia de vida de las especies, como la mortalidad, tasas de crecimiento y la capacidad de almacenamiento de carbono. Por lo tanto, a continuación se presentan las ecuaciones alométricas desarrolladas por Álvarez et al., IDEAM (2011) aplicables para los bosques húmedos Premontanos (bh-PM) en Colombia:

$$\ln(Bt) = 2,4210 - 1,415 * \ln(D) + 1,237 * (\ln(D))^2 - 0,126 * (\ln(D))^3 + 1,068 * \ln(\rho)$$

$$\ln(Bt) = -1,993 + 0,932 * \ln(D^2 * H * \rho)$$

Donde: Bt es la biomasa aérea de los árboles en kg. D es el diámetro medido a 1,30 m desde el suelo en centímetros (cm), ρ es la densidad de la madera de la especie (g/cm³), H es la altura total medido en metros (m).

Por último, se presenta la ecuación alométrica desarrollada por Álvarez et al., IDEAM (2011), cuya única variable independiente es el diámetro (DAP):

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

$$\ln(Bt) = -1,86601 + 2,37 * \ln(D)$$

1.3.2.4 Estimación del carbono

Las especies arbóreas deben considerarse reservas naturales de carbono, dada la capacidad fotosintética para capturar y almacenar el carbono en sus estructuras leñosas por grandes periodos de tiempo (Acosta et al., 2002). De acuerdo con IPCC (2003) aproximadamente el 50% de la biomasa seca del árbol es considerada carbono, como se presenta en la siguiente ecuación:

$$C = Bt * Rc$$

Donde: C es la captura de carbono estimada para cada árbol en kgC. Bt es la biomasa aérea en kg. Rc es el contenido de carbono almacenado en la biomasa, cuyo valor se estima en 50% según IPCC (2003).

1.3.2.5 Valoración económica

La estimación económica de un bien o servicio ambiental es una herramienta que refleja la importancia de los bienes o servicios derivados del recurso sobre el bienestar de la sociedad. La percepción de su relevancia es subjetiva porque varía de acuerdo al contexto de cada individuo, por lo tanto, es necesario cuantificarla, de tal manera que permita realizar comparaciones. El valor monetario, producto del análisis económico, es el instrumento de medición de los cambios en el bienestar individual o colectivo ante variaciones en las condiciones ambientales (Ministerio de Ambiente, 2003).

En el mundo existe el mercado de bonos de carbono, el cual permite realizar transacciones financieras con la captura o emisión evitada de una tonelada métrica (t) de dióxido de carbono equivalente (TCO_{2e}). Actualmente existen dos mercados principales para el carbono, en proyectos que se realicen en los países en vía de desarrollo. El mercado regulado, enmarcado por criterios internacionales definidos en el Protocolo de Kioto y el mercado voluntario donde existe una amplia gama de relaciones comerciales (MINAMBIENTE, s.f.).

En Colombia empezó a funcionar el mercado voluntario de carbono a través de la Bolsa Mercantil de Colombia (BMC) a partir del 18 de agosto del año 2016. Esta plataforma le asigna un valor monetario a las unidades de carbono capturadas, por lo tanto, el valor económico asociado a la captura y almacenamiento de carbono de una masa forestal puede hallarse multiplicando la captura de carbono registrada para cada especie por el precio de cada tonelada (BMC, 2016).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

2 METODOLOGÍA

El presente trabajo se llevó a cabo en la zona urbana de los municipios de Medellín y Envigado, pertenecientes a la subregión del Valle de Aburrá, el cual se encuentra localizado geográficamente en la cordillera Central entre los 1300 y 2800 m.s.n.m. con una precipitación media anual de 1500 mm y una temperatura media que varía de 16 a 25°C (GAIA & AMVA, 2006). Se caracteriza además por la formación del bosque húmedo Premontano (bh-PM) de acuerdo a la clasificación de zonas de vida propuesto por Holdridge (Restrepo, 2001).

Se utilizaron ecuaciones alométricas para estimar el crecimiento en diámetro, la biomasa y captura de carbono de tres especies arbóreas, clasificadas en tres grupos funcionales que se definieron en base a la densidad de la madera (ρ) reportada en la literatura, y a su vez distribuidas en cuatro clases diamétricas. Las especies seleccionadas fueron: el casco de vaca (*Bauhinia picta*), el búcaro (*Erythrina fusca*) y el guayacán amarillo (*Handroanthus chrysanthus*).

2.1 OBTENCIÓN DE LOS VALORES DE LAS VARIABLES DENDROMÉTRICAS

2.1.1 Selección de especies

Para la selección de las especies arbóreas en la zona urbana, se consultó el inventario de existencias disponible en el aplicativo Sistema del Árbol Urbano y con el apoyo del profesional forestal se identificaron diez (10) especies, para lo cual se tuvieron los siguientes criterios: su origen, otorgándole mayor relevancia a las especies nativas, la información disponible acerca de densidad de la madera; y por último, que representaran diferentes grupos sucesionales, de manera similar a como se tienen en el bosque natural, ya que se esperarían diferentes tasas de crecimiento para cada grupo. Se clasificaron en tres categorías: especies pioneras tempranas, especies pioneras tardías y especies tolerantes (ver Tabla 3).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 3. Preselección de especies

Nombre científico	Nombre común	Origen	Clasificación	Densidad (g/cm ³)
<i>Ceiba pentandra</i>	Ceiba	Nativa	Temprana	0,26
<i>Cecropia telenitida</i>	Yarumo	Nativa	Temprana	0,30
<i>Erythrina fusca</i>	Búcaro	Nativa	Temprana	0,30
<i>Persea caerulea</i>	Aguacatillo	Nativa	Temprana	0,43
<i>Swietenia macrophylla</i>	Caoba	Nativa	Tardía	0,56
<i>Cespedesia spathulata</i>	Pacó	Nativa	Tardía	0,61
<i>Samanea saman</i>	Samán	Nativa	Tardía	0,64
<i>Bauhinia picta</i>	Casco de vaca	Nativa	Tardía	~ 0,65
<i>Hymenaea courbaril</i>	Algarrobo	Nativa	Tolerante	0,82
<i>Handroanthus chrysanthus</i>	Guayacán amarillo	Nativa	Tolerante	1,04

Fuente: elaboración propia con datos de Arroyave, Posada, & Gutiérrez (2014).

2.1.2 Selección de árboles

Para la selección de los individuos se tuvieron en cuenta los siguientes criterios: el fácil acceso, el estado fitosanitario del árbol, el número de bifurcaciones en el tronco y la disponibilidad futura del individuo, es decir, que el árbol no lo fueran a talar del sitio donde se encontraba según los planes de movilidad proyectados en el territorio. Finalmente, se escogió una especie por categoría, teniendo en cuenta el número de individuos disponibles, obteniendo como resultado la información presentada en la Tabla 4.

Tabla 4. Especies de estudio

Nombre científico	Nombre común	Clasificación	Densidad (g/cm ³)
<i>Erythrina fusca</i>	Búcaro	Pionera temprana	0,3
<i>Handroanthus chrysanthus</i>	Guayacán amarillo	Tolerante	1,04
<i>Bauhinia picta</i>	Casco de vaca	Pionera tardía	~ 0,65

Fuente: elaboración propia con datos de Arroyave, Posada, & Gutiérrez (2014).

De cada especie se escogieron 20 individuos distribuidos uniformemente en cuatro clases diamétricas, las cuales se definieron con base en la información obtenida en campo, como se ilustra en la Tabla 5.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 5. Clases diamétricas por especie

Especie (Nombre común)	Clases diamétricas (cm)			
	1	2	3	4
Búcaro	0 – 25,0	25,1 – 45,0	45,1 - 55,0	55,1 – 121,0
Guayacán amarillo	0 – 12,0	12,1 – 20,0	20,1 -36,0	36,1 – 70,0
Casco de vaca	0 – 13,0	13,1 – 19,3	19,4 – 25,0	25,1 – 152,8

Con ayuda del profesional forestal se escogieron los individuos arbóreos. Para facilitar su identificación en campo se registraron las coordenadas de cada punto con un dispositivo GPS, además se marcó el punto de medición del DAP con pintura a base de aceite. En el Anexo 3, Anexo 4 y Anexo 5 se proporciona la información general de cada uno de los árboles seleccionados y finalmente, en el Anexo 6 se presenta el mapa con los individuos seleccionados y se proporciona el enlace para consultarlo en la web.

2.1.3 Mediciones en campo

Se realizaron tres mediciones en total para cada individuo seleccionado durante nueve meses, de la siguiente manera: la primera medición se registró a finales del mes de julio y durante agosto del año 2017; la segunda medición se llevó a cabo en el mes de diciembre del mismo año; y la última se realizó finalizando el mes de marzo del año 2018. A cada árbol se le tomó información de las siguientes variables dendrométricas: Árbol ID, Fecha, Altura DAP (cm), CAP (cm), Altura total del árbol (m), Altura base de copa (m) y muerte de copa (%). Adicionalmente, se incluyó la variable de exposición directa a la luz, que se midió en una escala de 0 a 1, donde 0 indica que no recibe luz, mientras que 1 indica que el individuo está expuesto parcial o completamente a la luz y finalmente, un espacio para observaciones generales.

A todos los árboles se le midió el diámetro a la altura del pecho (DAP = 1,30 m del suelo) con una cinta métrica, por debajo de la marca de pintura previamente establecida; para la altura total y base de copa se utilizó un clinómetro; y la muerte de copa (%) se estimó como el porcentaje de la copa que muestra signos de secamiento o muerte. Toda la información recopilada en campo se registró en una base de datos en Excel.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

2.2 ESTIMACIÓN DEL CRECIMIENTO EN DIÁMETRO

2.2.1 Cálculo de crecimiento

Para estimar el Incremento Medio Anual (IMA) en diámetro, se calculó inicialmente la diferencia entre dos medidas tomadas en diferentes periodos de tiempo ($DAP_3 - DAP_1$), lo cual permitió obtener el crecimiento de cada individuo durante los nueve meses del estudio. A partir de esa información, se encontraron las tasas de crecimiento anual para cada especie, de acuerdo a su tamaño, utilizando la ecuación desarrollada por Giraldo et al. (2011) que se presentó anteriormente.

Adicionalmente, se solicitó a la Secretaría de Medio Ambiente de Medellín el acceso a la base de datos de 16 especies reportadas en el SAU (ver Anexo 2), para obtener una serie de datos históricos de su crecimiento. Sin embargo, no se utilizó esta información porque carece de validez, dado que, algunos individuos no reportan ningún valor, otros solo registran una medición y finalmente los que poseen dos mediciones o más, reportan el mismo DAP en todos los años.

2.2.2 Comparación entre las especies

Con base en las tasas de crecimiento obtenidas para las distintas especies de los tres grupos funcionales, se realizó un análisis de varianza de una vía (ANOVA) utilizando el software estadístico Statgraphics, con el fin de establecer diferencias significativas entre ellas.

2.3 ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA TOTAL

Para el cálculo de la biomasa área se empleó la ecuación de Álvarez et al. (2013) cuyas variables independientes son la densidad de la madera y el diámetro del tronco, como se presenta a continuación:

$$\ln(Bt) = 2,4210 - 1,415 * \ln(D) + 1,237 * (\ln(D))^2 - 0,126 * (\ln(D))^3 + 1,068 * \ln(\rho)$$

Asimismo, se utilizaron las demás ecuaciones reportadas en la literatura para la zona de vida del área de estudio, con el propósito de establecer diferencias significativas entre los modelos alométricos.

Para la estimación de estos parámetros en todos los árboles del Valle de Aburrá, reportados en el SAU de las tres especies de análisis, se consultó la base de datos proporcionada por la Secretaría de Medio Ambiente de Medellín. A cada clase diamétrica se le aplicó la tasa

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

de crecimiento producto del presente estudio, es decir, se calculó el crecimiento que correspondía a la duración del estudio (9 meses) y con base en este, se estimó el crecimiento medio anual. Posteriormente se estimó el incremento en biomasa a partir del crecimiento en diámetro.

2.4 ESTIMACIÓN DE LA CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CARBONO DE LAS TRES ESPECIES Y EL VALOR ECONÓMICO ASOCIADO

2.4.1 Cálculo del carbono

Luego de estimar el incremento en biomasa de las especies de estudio, se determinó la captura y almacenamiento de carbono, considerando que el 50% de la biomasa seca corresponde a carbono (IPCC, 2003).

2.4.2 Estimación del valor económico

El valor económico asociado a la captura de dióxido de carbono utilizado actualmente en Colombia se estableció a partir del valor comercial de los bonos de carbono, regulado por la bolsa mercantil, con un valor total de COP \$15.000 por cada tonelada (Phillips, 2018, comunicación personal).

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 VARIABLES DENDROMÉTRICAS

Se analizaron las variables dendrométricas de las tres especies de estudio a través de la medición de 60 individuos en campo (ver Anexo 7, Anexo 8 y Anexo 9). En la Tabla 6 se presentan los valores medios obtenidos y su desviación estándar para cada periodo de muestreo y se puede evidenciar que los individuos de mayor diámetro pertenecen a la especie *E. fusca*, seguido de *H. chrysanthus* y por último, *B. picta*. Se encontró también que todos los árboles presentaban un buen estado fitosanitario, sin muerte de copa, y en general, con exposición directa a la luz.

Tabla 6. Valores medios y desviación estándar () de las tres especies para cada periodo de muestreo

ESPECIE	DAP promedio (cm) y desviación estándar			Altura árbol (m)	
	Jul - Ago 2017	Dic 2017	Mar 2018	Total	Base copa
<i>B. picta</i>	21,962 (11,511)	22,469 (11,304)	22,785 (11,257)	8,725 (3,454)	2,075 (1,004)
<i>H. chrysanthus</i>	24,710 (15,121)	24,865 (15,069)	24,917 (15,077)	10,275 (5,180)	4,640 (2,467)
<i>E. fusca</i>	41,710 (19,848)	41,802 (19,846)	41,837 (19,844)	9,824 (4,015)	5,088 (2,959)

3.2 ESTIMACIÓN DEL CRECIMIENTO DIAMÉTRICO

3.2.1 Incremento medio anual (IMA)

Bauhinia picta reportó el mayor crecimiento, con un valor medio de 11,918 mm/año, seguido de *Handroanthus chrysanthus* que obtuvo un incremento de 2,997 mm/año, y finalmente *Erythrina fusca*, con un valor de 1,844 mm/año. En la Tabla 7 se presentan los valores mínimos, medios y máximos, al igual que el grupo funcional al que pertenecen de acuerdo con la densidad de su madera y la tasa de crecimiento esperada.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 7. Incremento medio anual (IMA) y desviación estándar (s) de las tres especies.

ESPECIE	N	Incremento en diámetro (mm/año)			Grupo funcional	Tasa de crecimiento esperada
		Min	Medio	Máx		
<i>Bauhinia picta</i>	20	0,922	11,918 (5,724)	21,208	Pionera tardía	Media
<i>Handroanthus chrysanthus</i>	20	0,000	2,997 (2,784)	9,682	Tolerante	Baja
<i>Erythrina fusca</i>	17	0,000	1,844 (2,328)	7,838	Pionera temprana	Alta

En general, las tasas de crecimiento en diámetro no corresponden a lo esperado de acuerdo a su grupo funcional. Por ejemplo, para *E. fusca*, clasificada como una especie pionera temprana de acuerdo con su densidad, se esperaría una tasa de crecimiento mayor que las otras dos, sin embargo, obtuvo la menor tasa y con una alta variabilidad, que pudo estar afectada por la presencia de valores atípicos o extremos en la muestra. Además, debe considerarse que para la especie *Erythrina fusca* se descartaron tres datos experimentales, dado que se reportó un incremento negativo asociado a una medición errónea. En el caso de la especie *Handroanthus chrysanthus* se encontraron dos valores atípicos según el criterio de Chauvenet, como se muestra en la en la **Figura 1**, lo cual afecta la variabilidad de la muestra y pueden ser explicados por una mayor exposición a la luz y el mantenimiento constante del individuo por parte del Jardín Botánico de Medellín. Sin embargo, estos valores no se descartaron.

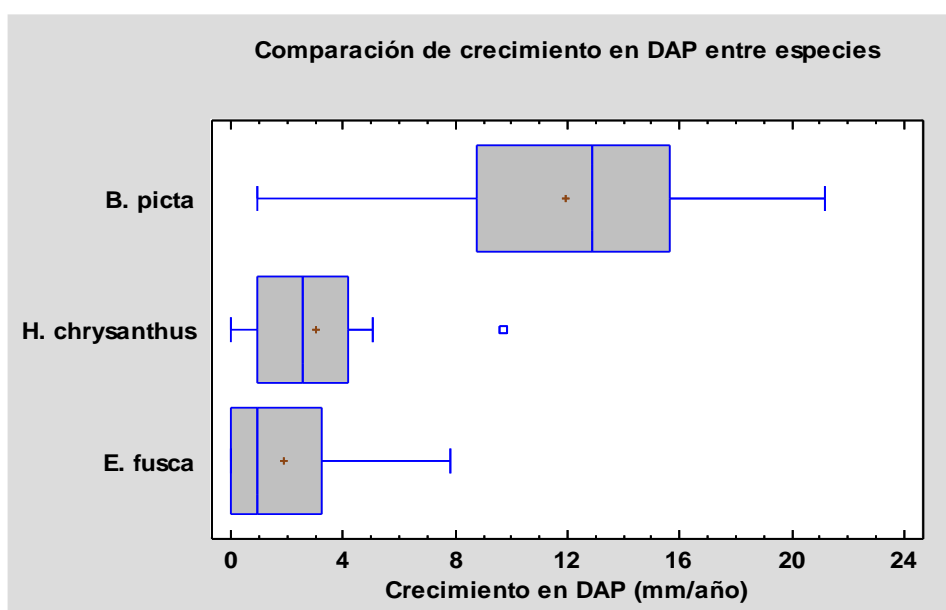


Figura 1. Comparación de crecimiento en DAP entre especies

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.2.1.1 Crecimiento para cada clase diamétrica

Se establecieron cuatro clases diamétricas para cada especie de acuerdo con el DAP máximo reportado en la literatura y la información en campo. Por lo tanto, no es posible realizar comparaciones entre especies para cada rango, dado que estos difieren entre sí. Sin embargo, se pudo determinar que las tres especies reportan el mayor incremento medio en diámetro en la tercera clase diamétrica, en un rango entre 25 y 45 cm aproximadamente, como se presenta en la Figura 2, la Figura 3 y la Figura 4.

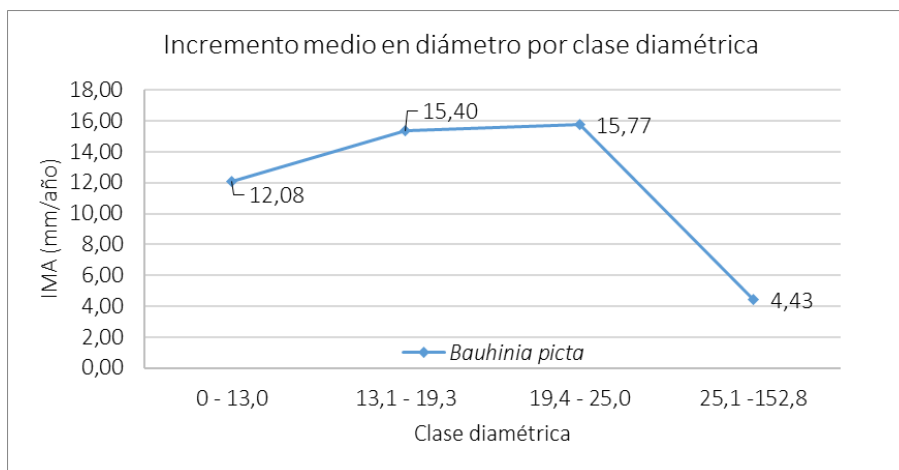


Figura 2. IMA para cada clase diamétrica de *B. picta*

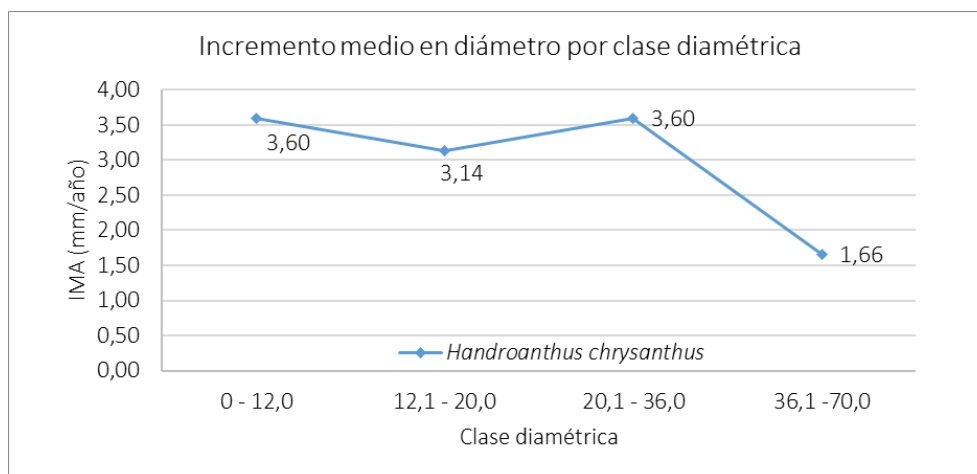


Figura 3. IMA para cada clase diamétrica de *H. chrysanthus*

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

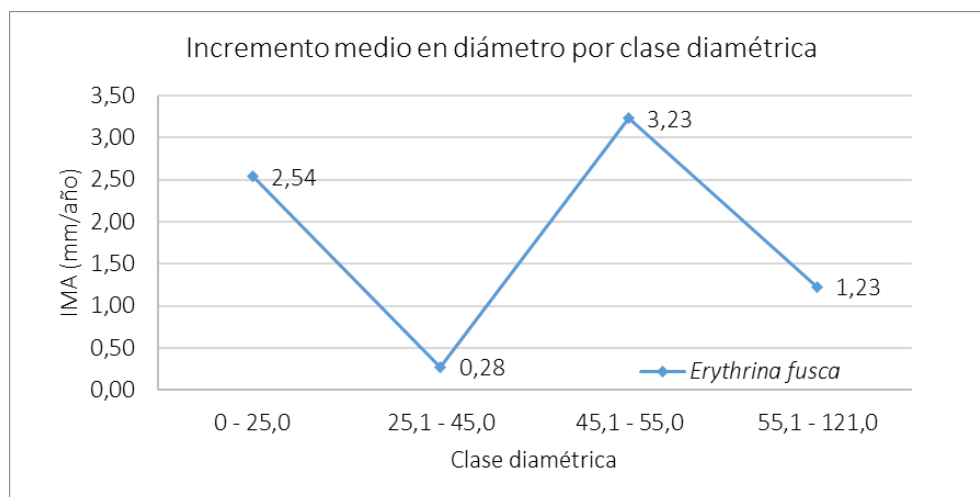


Figura 4. IMA para cada clase diamétrica de *E. fusca*

3.2.2 Comparación entre las especies

Para realizar el análisis de varianza de una vía (ANOVA), con el fin de evaluar si existían diferencias significativas en las tasas de crecimiento promedio anual entre las tres especies, fue necesario comprobar los supuestos del modelo, es decir, normalidad, homogeneidad de varianzas e independencia estadística. Sin embargo, el estudio de normalidad mediante la prueba Shapiro – Wilk permitió determinar, con un nivel de confianza del 95%, que las especies *H. chrysanthus* y *E. fusca* no siguen una distribución normal (*Valor-P*: 0,005 y *Valor-P*: 0,001 respectivamente), por lo tanto, se desarrolló el análisis mediante la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis.

Se encontraron diferencias estadísticamente significativas en el incremento diamétrico entre las especies (*Valor-P*: 8,915E-7). El crecimiento de la especie *Bauhinia picta* es estadísticamente diferente del crecimiento de *H. chrysanthus* y *E. fusca*. Sin embargo, entre estas dos últimas no se encontraron diferencias significativas, como se describe en la Tabla 8 donde se denota con (*) las diferencias significativas entre pares de grupos.

Tabla 8. Prueba estadística Kruskal-Wallis. Intervalos de confianza del 95,0%

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
<i>B. picta</i> - <i>H. chrysanthus</i>	*	21,05	12,5656
<i>B. picta</i> - <i>E. fusca</i>	*	26,8706	13,1082
<i>H. chrysanthus</i> - <i>E. fusca</i>		5,82059	13,1082

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Contrario a lo que se esperaba, la especie *B. picta*, clasificada como pionera tardía, reporta un crecimiento mayor que las demás. Por su parte, *E. fusca* y *H. chrysanthus*, clasificadas como pionera temprana y tolerante, respectivamente, reportan la menor tasa de crecimiento en diámetro, como se ilustra en la Figura 5.

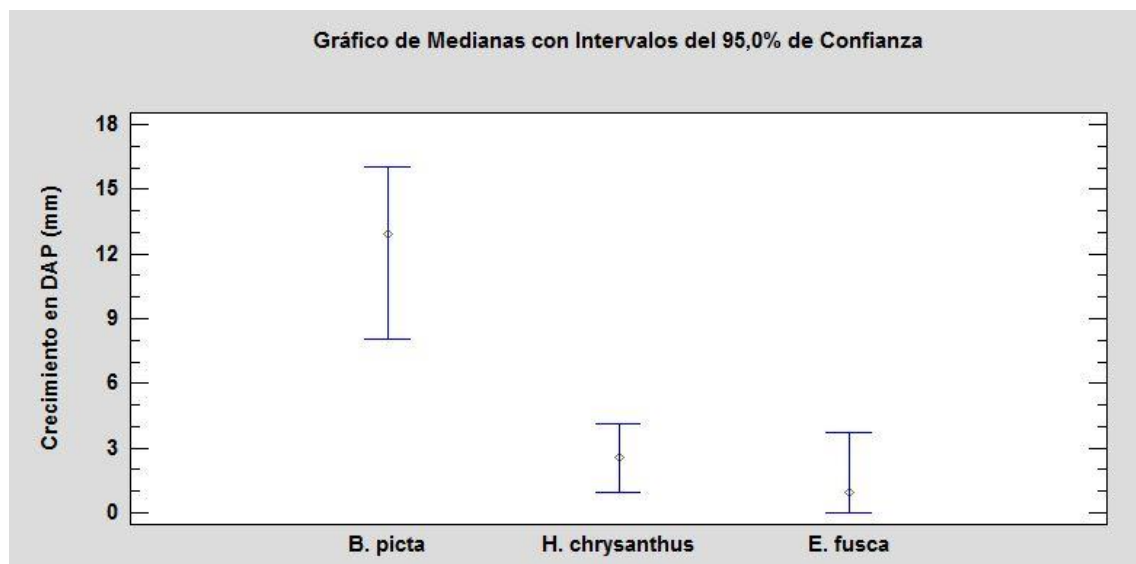


Figura 5. Gráfico de medianas. Método Kruskal – Wallis

Los resultados obtenidos coinciden con los datos reportados por Giraldo, Cárdenas & Duque (2011) quienes tampoco encontraron que las diferencias en el crecimiento de las especies se asocian a los grupos funcionales definidos de acuerdo con la densidad de la madera. En dicho estudio evaluaron seis especies arbóreas de la Amazonia colombiana y no reportaron diferencias significativas entre ellas, a pesar de haber sido clasificadas en tres grupos funcionales.

3.3 ESTIMACIÓN DE BIOMASA

Para estimar la biomasa seca total del individuo, se utilizó el modelo alométrico que relaciona el diámetro a la altura del pecho con la densidad de la madera, dado que brinda mayor precisión en los resultados. Sin embargo, se evaluaron los cinco modelos alométricos reportados para el área de estudio, con el fin de analizar diferencias significativas entre ellos.

A continuación, en la Tabla 9 se reporta el incremento medio en biomasa total para cada una de las especies con su respectiva desviación estándar. En este caso, *B. picta* es quien reporta el mayor incremento medio. Por otro lado, *H. chrysanthus* obtuvo mayor biomasa

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

total, como se esperaba, puesto que tiene mayor densidad, con un valor de 23,6 toneladas, seguido de *E. fusca* con 15,9 toneladas y, por último *B. picta* con un valor 9,8 toneladas.

Tabla 9. Incremento medio en biomasa total y desviación estándar () por especie

ESPECIE	Incremento en biomasa (kg/año)		
	Mínimo	Medio	Máximo
<i>Bauhinia picta</i>	6,006	35,206 (22,819)	87,498
<i>Handroanthus chrysanthus</i>	0,000	19,570 (22,142)	73,626
<i>Erythrina fusca</i>	0,000	7,677 (11,014)	32,206

Así mismo, en la Figura 6, la Figura 7 y la Figura 8 se presenta el incremento medio anual en biomasa encontrado para cada una de las clases diamétricas por especie. La información obtenida muestra que el mayor incremento medio se dio en los individuos cuyo DAP se encontraba entre 25 y 45 cm aproximadamente.

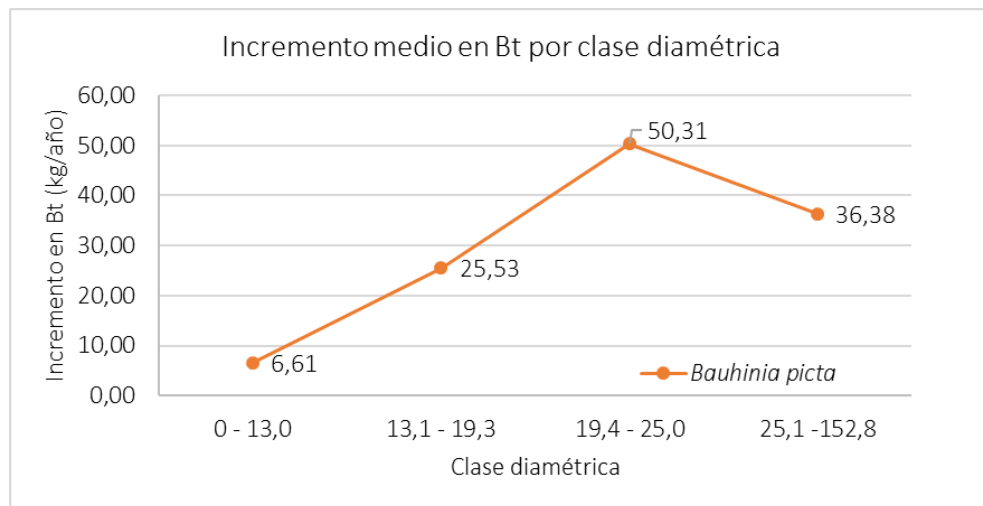


Figura 6. Incremento medio en Bt por clase diamétrica para *B. picta*

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

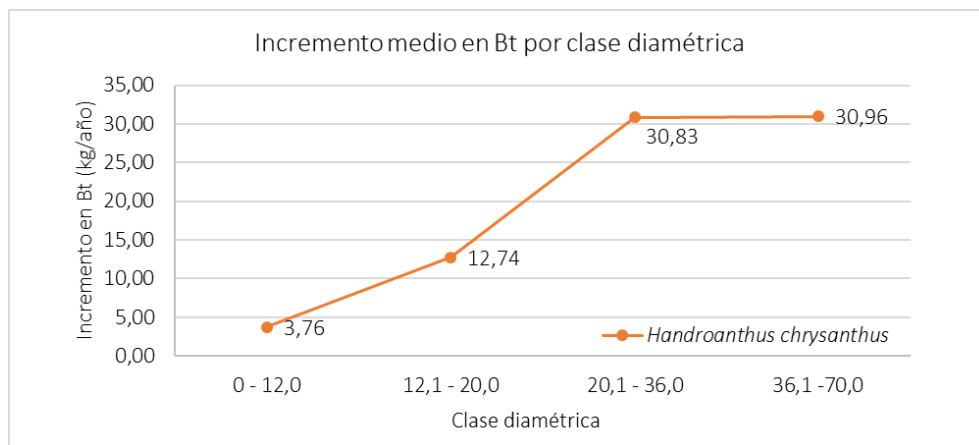


Figura 7. Incremento medio en Bt por clase diamétrica para *H. chrysanthus*

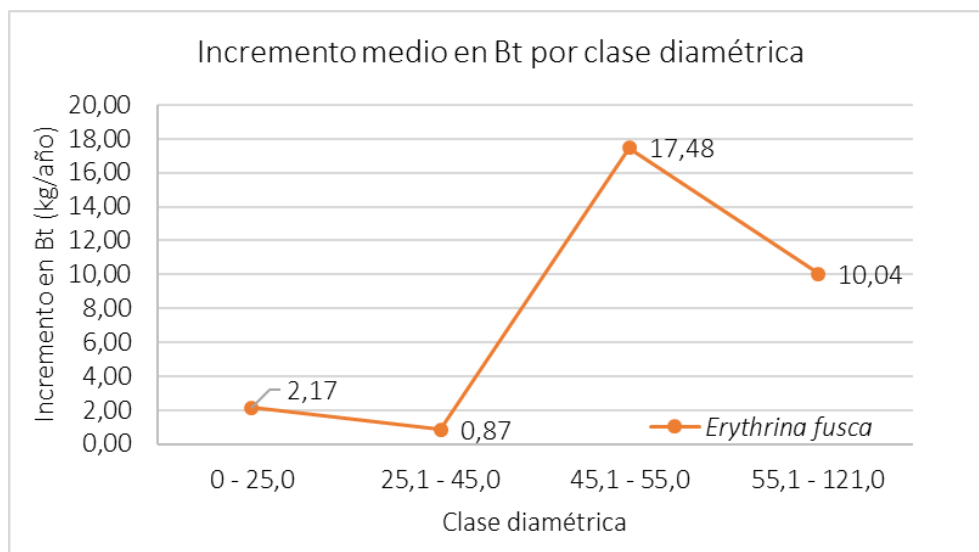


Figura 8. Incremento medio en Bt por clase diamétrica para *E. fusca*

3.3.1 Comparación del crecimiento en biomasa entre las especies

3.3.1.1 Grupos funcionales

Mediante la prueba de Kruskal – Wallis se realizó el análisis comparativo entre las especies y se pudo determinar que existen diferencias significativas en el incremento en biomasa (*Valor-P: 0,0002*). Adicionalmente, se realizó una comparación por pares entre los rangos promedio de los tres grupos donde se evidencia que la especie *B. picta* tiene una mayor variabilidad en los datos, como se describe en la Tabla 10 y se evidencia en la Figura 9.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 10. Prueba estadística de Múltiples rangos para Biomasa. Intervalos de confianza del 95,0%

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
<i>B. picta</i> - <i>H. chrysanthus</i>	*	13,15	12,5656
<i>B. picta</i> - <i>E. fusca</i>	*	22,4176	13,1082
<i>H. chrysanthus</i> - <i>E. fusca</i>		9,26765	13,1082

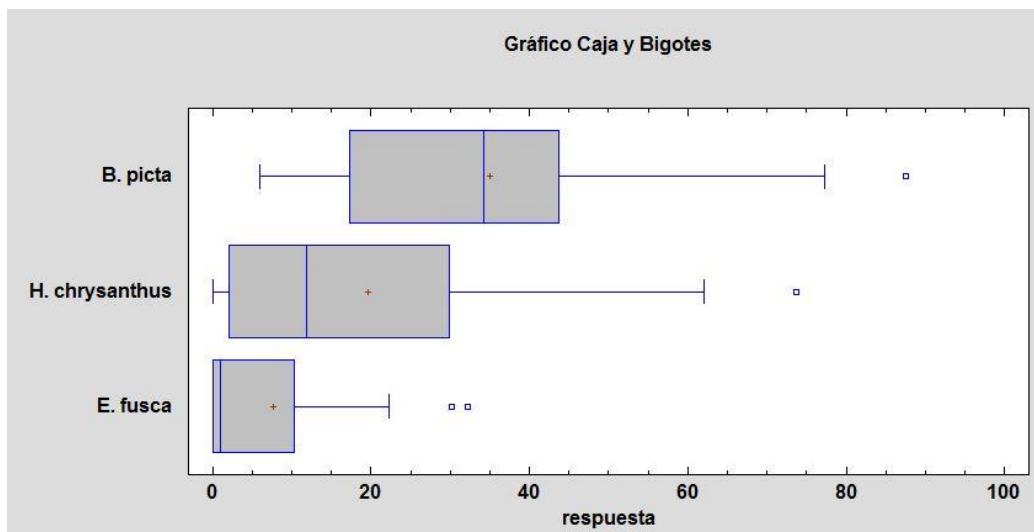


Figura 9. Comparación del incremento en biomasa de las tres especies

3.3.1.2 Comparación de las ecuaciones de biomasa

Para este análisis en particular, se evaluaron las diferencias significativas entre los cinco modelos de biomasa seca total para cada especie con el valor de biomasa total del individuo registrada en la última medición –DAP₃–, mediante una prueba ANOVA ya que se cumplen los supuestos del modelo.

En las especies *B. picta* y *H. chrysanthus* no se encontraron diferencias significativas entre los modelos alométricos; mientras que, para la especie *E. fusca* se presentan diferencias estadísticamente significativas en la biomasa estimada con las cinco ecuaciones (*Valor-P*: 0,0029). Mediante una comparación múltiple se determinaron cuáles fueron las ecuaciones

significativamente

diferentes

(ver

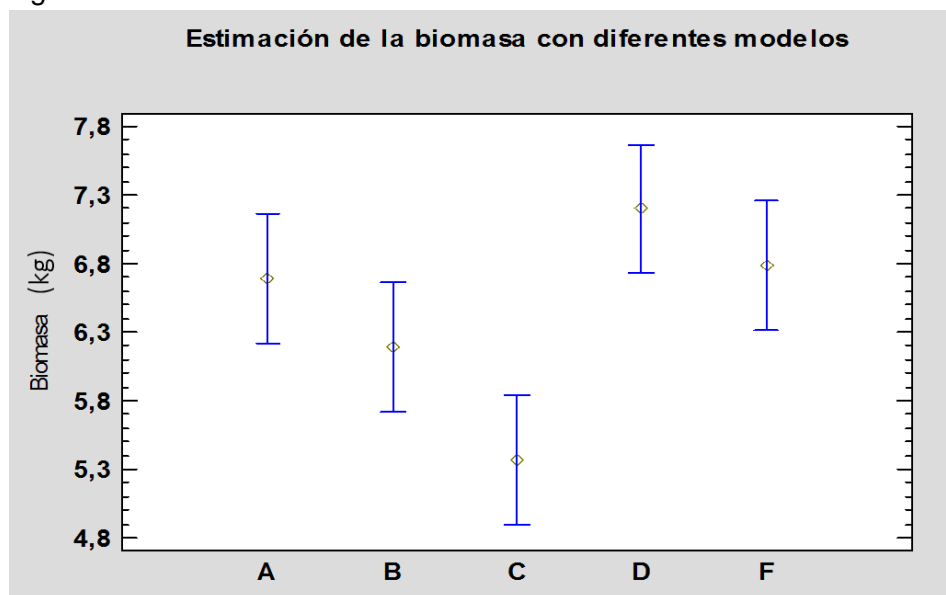


Figura 10). En la Tabla 11 se presentan los resultados obtenidos, donde se evidencia que la ecuación alométrica que utiliza la altura (H) como variable del modelo difiere de tres modelos, entre los cuales está la ecuación desarrollada en Porce por Orrego et al. (2003) y el modelo de Álvarez et al. (2011) que se ajusta a las características de los ecosistemas boscosos colombianos, lo cual podría estar asociado al mantenimiento del arbolado urbano, ya que la altura registrada en campo varía de acuerdo a la poda que se le realiza a los individuos.

Tabla 11. Método LSD 95%

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Álvarez et al. (2013) DAP,H, p	17	5,36413	X
Álvarez et al. (2013) DAP, p	17	6,19408	XX
Álvarez et al. (2013) DAP	17	6,68994	XX
Orrego et al. (2003)	17	6,78699	XX
Brown (1997)	17	7,19836	X

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

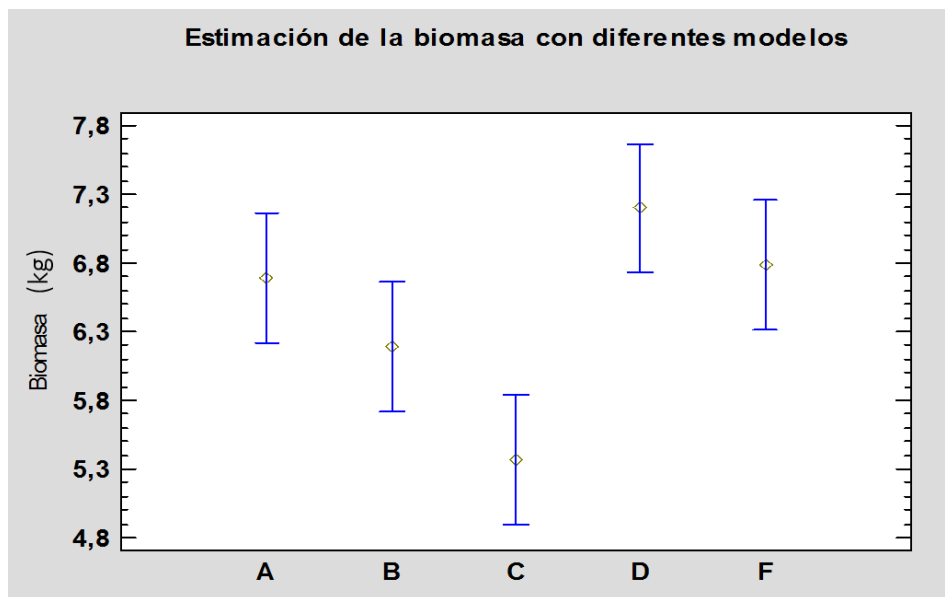


Figura 10. Estimación de la biomasa con los cinco modelos para *E. fusca*

Nota: (A) hace referencia a la ecuación de Álvarez et al. (2013) que solo utiliza el DAP como variable independiente. (B) es la ecuación de Álvarez et al. (2013) cuyas variables independientes son DAP y densidad. (C) ecuación de Álvarez et al. (2013) que utiliza el DAP, altura y densidad. (D) es la ecuación de Brown (1997) que solo depende del DAP y finalmente (F) es la ecuación de Orrego et al. (2003) utilizada en Porce que depende del DAP.

3.4 CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CARBONO

El contenido total de carbono almacenado en la biomasa aérea de la especie *H. chrysanthus*, que reportó la mayor fijación, fue de 11.784 kg. Seguido de *E. fusca* con un valor de 7.988 kg. Por último, *B. picta* almacenó en total 4.918 kg. A su vez, se determinó la captura media por especie, como se describe en la Tabla 12. Por último, se estimó la captura media según la clasificación diamétrica, con el propósito de validar el rango de mayor captura, como se presenta en la Figura 11, la Figura 12 y la Figura 13.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 12. Captura de carbono y desviación estándar () de las especies

ESPECIE	Captura media (kgC/año)	Almacenamiento total (kgC)
<i>Bauhinia picta</i>	17,513 (11,410)	4.918,722
<i>Handroanthus chrysanthus</i>	9,785 (11,071)	11.784,859
<i>Erythrina fusca</i>	3,839 (5,507)	7.988,343

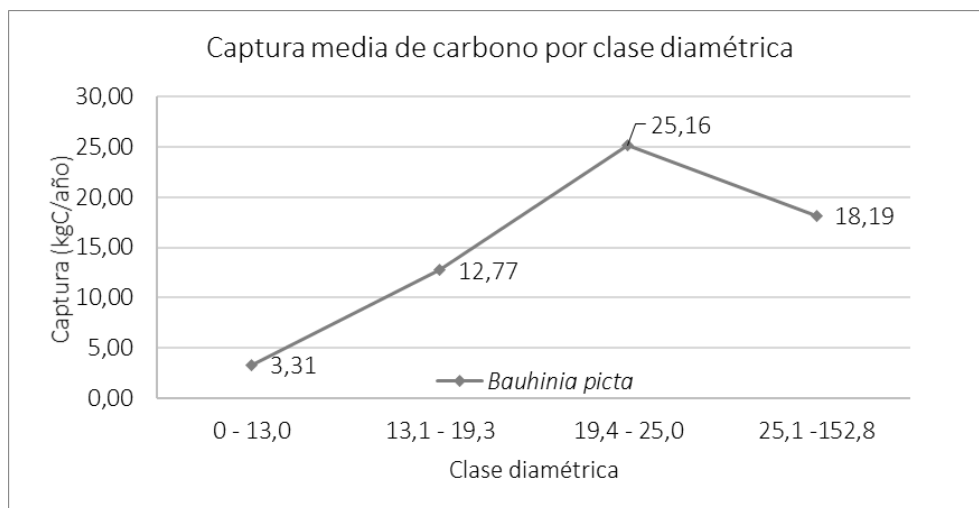


Figura 11. Captura media de carbono para cada clase diamétrica de *B. picta*

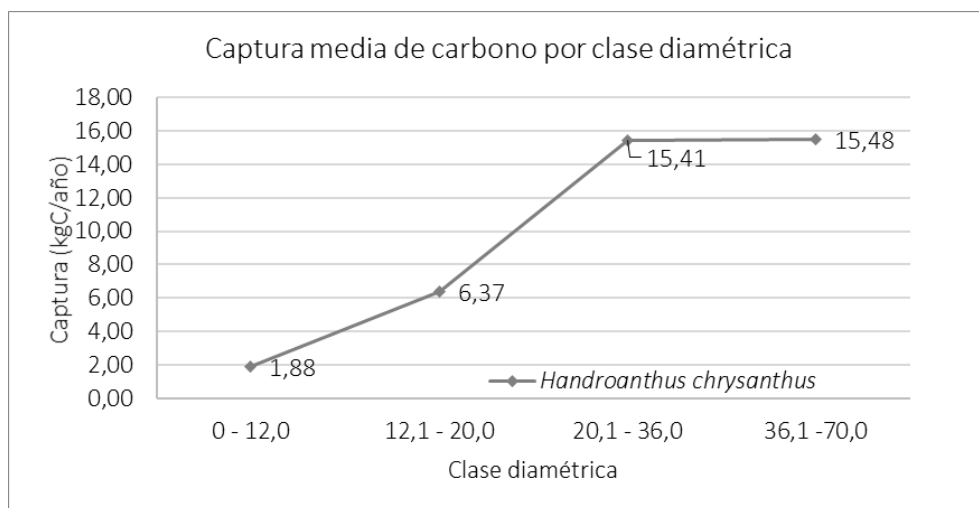


Figura 12. Captura media de carbono para cada clase diamétrica de *H. chrysanthus*

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

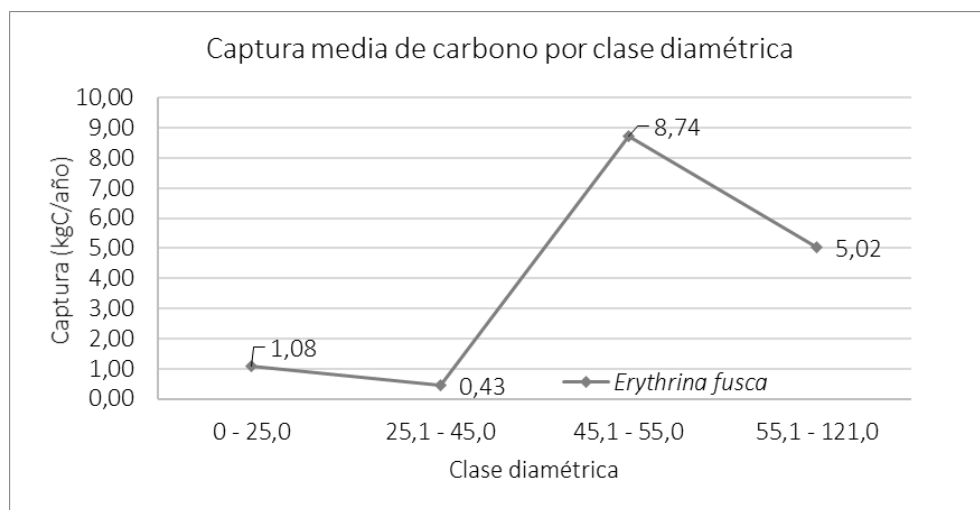


Figura 13. Captura media de carbono para cada clase diamétrica de *B. picta*

3.4.1 Comparación entre especies

El análisis de varianza mostró diferencias estadísticamente significativas entre especies (*Valor-P: 0,0005*), como se ilustra en la Figura 14, donde se evidencia que la especie *B. picta* difiere de *H. chrysanthus* y *E. fusca*.

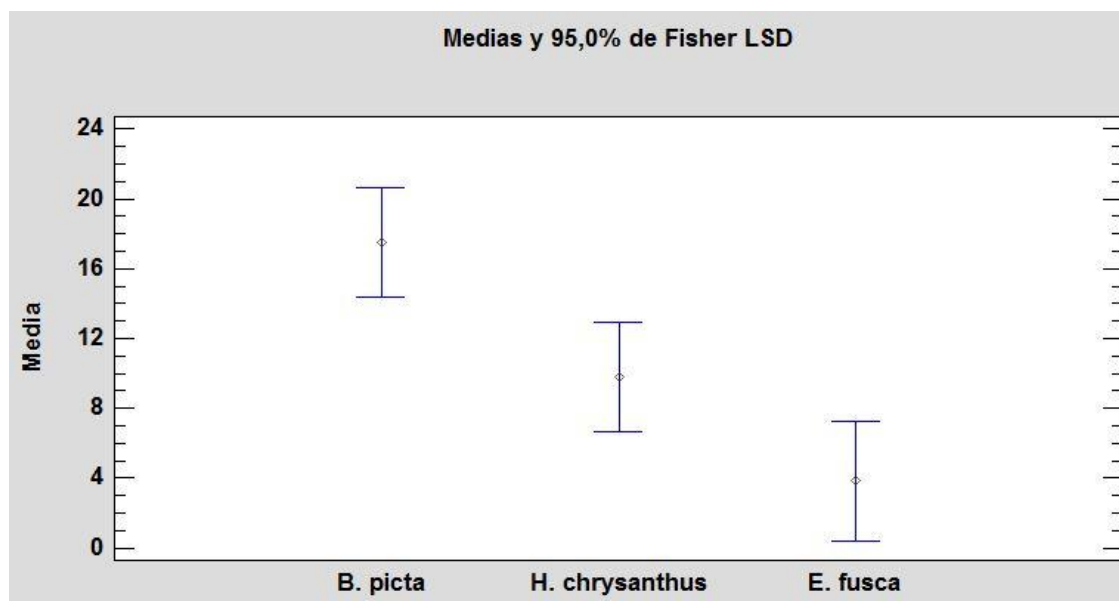


Figura 14. Captura media de carbono e intervalo de confianza para cada especie

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.4.2 Estimación valor económico

La base de datos del SAU permitió determinar la cantidad total de individuos para cada una de las tres especies de estudio con su respectivo diámetro. Con base en las tasas de crecimiento en diámetro, incremento en biomasa y captura de carbono, se estimó la captura total de carbono en un año para la zona urbana del Valle de Aburrá y su respectivo valor económico asociado, el cual se estableció según el precio del mercado, en este caso de COP \$ 15000 por cada tonelada de carbono fijado en la biomasa aérea (Phillips, 2018, comunicación personal).

Los resultados obtenidos para cada una de las especies según su clasificación diamétrica se presentan en la Tabla 13, y finalmente, para el servicio de secuestro y almacenamiento de carbono se obtuvo un valor total de COP \$ 276.120,856 al año con un total de 3.658 individuos distribuidos en las tres especies de estudio.

Tabla 13. Captura y almacenamiento de carbono en la zona urbana del Valle de Aburrá

ESPECIE	Clase diamétrica	N	Bt - AMVA (kg)	Contenido total C - AMVA (kgC)	Precio (COP \$)
<i>Bauhinia picta</i>	0 - 13,0	314	2.076,084	1.038,042	15.570,630
	13,1 - 19,3	95	2.425,698	1.212,849	18.192,736
	19,4 - 25,0	55	2.767,161	1.383,581	20.753,710
	25,1 -152,8	234	8.512,971	4.256,485	63.847,282
Total		698	15.781,914	7.890,957	118.364,358
<i>Handroanthus chrysanthus</i>	0 - 12,0	1736	6.530,609	3.265,305	48.979,571
	12,1 - 20,0	183	2.330,920	1.165,460	17.481,898
	20,1 - 36,0	219	6.750,741	3.375,371	50.630,559
	36,1 -70,0	72	2.228,776	1.114,388	16.715,822
Total		2.210	17.841,047	8.920,523	133.807,849
<i>Erythrina fusca</i>	2 - 25,0	336	728,251	364,125	5.461,880
	25,1 - 45,0	242	209,788	104,894	1.573,411
	45,1 - 55,0	71	1.240,899	620,449	9.306,741
	55,1 - 121,0	101	1.014,216	507,108	7.606,617
Total		750	3.193,153	1.596,577	23.948,649

Fuente: elaboración propia con datos de Secretaría de Medio Ambiente Medellín (2018).

En general, se identificaron tres posibles fuentes de error que pueden incidir en los resultados de la investigación. La primera, debido a las discrepancias en las remediciones de las variables dendrométricas por su complejidad, principalmente las bifurcaciones en el tallo, las protuberancias y deformidades. También debe considerarse el error asociado a la

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

lectura o posición de la cinta al momento de hacer la medición; y finalmente, errores de digitación de datos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

4 CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

La investigación permitió determinar que existen diferencias significativas en las tasas de crecimiento en diámetro, aumento en biomasa y captura de carbono entre las especies. Sin embargo, estas diferencias no corresponden a las tasas esperadas según su clasificación funcional, puesto que *B. picta*, clasificada como pionera tardía obtuvo el mayor crecimiento en las tres variables, mientras que *H. chrysanthus* y *E. fusca* mostraron las menores tasas, sin diferencias entre sí. Por lo tanto, la densidad de la madera, como único criterio para agrupar a las especies en diferentes grupos funcionales, no se considera un buen indicador y se recomienda para estudios posteriores, la clasificación de especies según sus rasgos funcionales.

Los modelos alométricos reportados en la literatura para la estimación de la biomasa aérea en la zona de estudio, presentaron diferencias significativas entre sí para la especie *E. fusca*, donde se obtuvo que la ecuación desarrollada por Álvarez et al. (2013) que incluía la altura (H) como variable independiente difiere estadísticamente de los demás. Por lo tanto, no se recomienda utilizar esta ecuación alométrica en el entorno urbano, ya que los individuos pueden estar sometidos a mantenimiento constante, lo cual involucra en algunos casos, la poda de sus copas, modificando la altura total del árbol. Además, se concluye que las diferencias encontradas entre los cinco modelos pueden deberse a la especie y no al modelo como tal.

La captura y almacenamiento de carbono de las tres especies en el bosque urbano durante un año, contrario a lo esperado, no es significativa, por lo tanto, su valor económico asociado no refleja la importancia del servicio ecológico que está ofreciendo el bosque urbano al bienestar de la población, lo cual dificulta el desarrollo de estrategias que tienen como objetivo la obtención de incentivos económicos para conservar el bosque y reducir las emisiones de GEI, garantizando la sostenibilidad ambiental y financiera del proyecto. Por lo tanto, se recomienda cuantificar los demás servicios, directos e indirectos que proporciona el arbolado urbano, de tal manera que su valor económico refleje la importancia ambiental y social.

Por otro lado, la revisión bibliográfica que se realizó para reportar las tasas de crecimiento de otras especies de interés en el contexto urbano, permitió identificar una brecha en el conocimiento acerca del comportamiento de las especies sometidas a condiciones urbanas, dado que las investigaciones desarrolladas en este tema, se canalizan hacia especies maderables principalmente y en su mayoría en plantaciones forestales y ecosistemas naturales, contrario al estrés generado en las grandes ciudades.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Es importante denotar que este estudio se desarrolló durante nueve meses debido a las limitaciones de tiempo en el calendario académico, sin embargo, se recomienda para investigaciones posteriores, calcular las variables dendrométricas durante un año, de tal manera que se puedan abarcar todos los periodos secos y de lluvia, e incluso durante varios años para analizar las variaciones multianuales entre individuos y especies.

A partir de los resultados obtenidos, se considera valioso continuar estudiando el comportamiento de los árboles en las ciudades y avanzar en el conocimiento, con el propósito de entender las diferencias adaptativas entre especies y promover estrategias de manejo en el diseño paisajístico de los proyectos y también de conservación, a través de los mecanismos de pago por servicios ambientales, donde se generen incentivos para mantener el ecosistema en su estado actual. Lo cual contribuye al funcionamiento global de los ecosistemas e incide directamente en la salud y bienestar de los ciudadanos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

REFERENCIAS

- Acosta M, M., Vargas H, J., Velázquez M, A., & Etchevers B, J. D. (2002). Estimación De La Biomasa Aérea Mediante El Uso De Relaciones Alométricas En Seis Especies Arbóreas En Oaxaca, México Aboveground Biomass Estimation By Means of Allometric Relationships in Six Hardwood Species in Oaxaca, México.
- Alcaldía de Medellín. (2011). *Medellín en cifras*. Medellín. Retrieved from https://www.medellin.gov.co/irj/go/km/docs/pccdesign/SubportaldelCiudadano_2/Plan deDesarrollo_0_17/Publicaciones/Shared Content/Medellin en Cifras/2014/PDFs/Medellín en Cifras N°1.pdf
- Alcaldía de Medellín. (2014). *Más bosques para Medellín*. (C. Gutiérrez Vásquez & L. Osorio Vélez, Eds.). Medellín.
- Álvarez, E., Benítez, D., Velásquez, C., & Cogollo, Á. (2013). Densidad Básica Del Fuste De Árboles Del Bosque Seco En La Costa Caribe De Colombia. *Revista Intropica*, 8(51), 17–28.
- Álvarez, E., Saldarriaga, J.G.Álvarez, E., Saldarriaga, J. G., Duque, A. J., Cabrera, K. R., Yepes, A. P., Navarrete, D. A., & Phillips, J. F. (2011). Selección y validación de modelos para la estimación de la biomasa aérea en los bosques naturales de Colombia. Instit, 26., Duque, A. J., Cabrera, K. R., Yepes, A. P., Navarrete, D. A., & Phillips, J. F. (2011). Selección y validación de modelos para la estimación de la biomasa aérea en los bosques naturales de Colombia. *Instituto de Hidrología, Metereologia Y Estudios Ambientales - IDEAM*, 26. Retrieved from <http://www.ideam.gov.co/documents/13257/13548/Modelos+alometricos+Carbono.pdf/cc9e929f-50c2-4f6c-90d9-0a9affc20e3c>
- AMVA. (2006). *Árboles ornamentales en el valle de Aburrá* (1st ed.). Medellín.
- AMVA. (2014). Cinturón Verde Metropolitano del Valle de Aburrá. *Area Metropolitana*, 24.
- AMVA, UNAL, Cornare, & CORANTIOQUIA. (2005). *Plan de ordenación y manejo de la cuenca del Rio Aburrá -POMCA*. Medellín. Retrieved from http://www.metropol.gov.co/Planeacion/DocumentosAreaPlanificada/POMCA_C5_susistema_biotico_VariableFlorayFauna.pdf
- AMVA, & UPB. (2015). *Política Pública de Construcción Sostenible*. Medellín. Retrieved from <http://www.metropol.gov.co/ConstruccionSostenible/Documents/PPCSIIILineamientos 27112015.pdf>
- Arroyave, M. del P., Posada, M., & Gutiérrez, M. (2014). Catálogo virtual de flora del Valle de Aburrá. Retrieved from <https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/>

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Bedoya, J., & Martínez, E. (2009). CALIDAD DEL AIRE EN EL VALLE DE ABURRÁ ANTIOQUIA -COLOMBIA. *Scielo*, 158, 7–15. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v76n158/a01v76n158.pdf>
- BMC. (2016). *Colombia tendrá Mercado Voluntario de Carbono a través de la Bolsa Mercantil de Colombia*. Bogotá. Retrieved from <http://www.bolsamercantil.com.co/wp-content/uploads/2015/04/21-COLOMBIA-TENDRA-MERCADO-VOLUNTARIO-DE-CARBONO-A-TRAVES-DE-LA-BMC-Y-ANEXOpdf.pdf>
- Chou, S. W., & Gutiérrez Espeleta, E. E. (2012). Equation for estimating tree biomass in tropical forests of Costa Rica. *Teconología En Marcha*, 26(2), 41–54.
- Corporación Ambiental Empresarial Fundación NATURA. (2014). *Crecimiento, biomasa acumulada y carbono capturado de 25 especies de árboles y arbustos nativos de la cordillera oriental colombiana*. Bogotá. Retrieved from http://www.mvccolombia.co/images/Informe_Final_La_Poma_CAEM-Fundación_Natura.pdf
- Daniels, F., Martínez, E., Quinchía, R., Morales, O., Romero, A., Marín, A., & Arbeláez, M. (2007). *CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA*. Medellín. Retrieved from [https://www.medellin.gov.co/irj/go/km/docs/wpccontent/Sites/Subportal del Ciudadano/Salud/Secciones/Publicaciones/Documentos/2012/Investigaciones/Contaminación atmosférica y efectos sobre la salud de la población.pdf](https://www.medellin.gov.co/irj/go/km/docs/wpccontent/Sites/Subportal%20del%20Ciudadano/Salud/Secciones/Publicaciones/Documentos/2012/Investigaciones/Contaminación%20atmosférica%20y%20efectos%20sobre%20la%20salud%20de%20la%20población.pdf)
- GAIA, & AMVA. (2006). *Composición y distribución de la herpetofauna en el valle de aburrá. Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental*. Medellín. <https://doi.org/10.15446/gma.1000>
- Gamarra, J. (2001). Estimación del contenido de carbono en plantaciones de Eucalyptus globulus labill, en Junin, Perú. *Simposio Internacional Medición Y Monitoreo de La Capruta de Carbono En Ecosistemas Forestales*, 1–21. Retrieved from http://www.mvccolombia.co/images/Informe_Final_La_Poma_CAEM-Fundación_Natura.pdf
- Giraldo, W., Cárdenas, D., & Duque, Á. (2011). Alometría Y Crecimiento De Seis Especies Arbóreas En Un Bosque De Tierra Firme En La Amazonia Colombiana. *Colombia Forestal*, 14(1), 9–21.
- Google. (s.f.). [Mapa de individuos seleccionados en la zona urbana de Medellín y Envigado en Google maps]. Retrieved from https://drive.google.com/open?id=1RbWkRKK410cvtk_0lsbCl1mI4cZs_h&usp=sharing
- IPCC. (2003). *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Intergovernmental Panel on Climate Change, Good Practice Guidelines on Land Use, Land Use Change and Forestry*. Retrieved from the Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC ?

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Lema Tapias, Á. (1979). *Introducción a la dasometría*. Medellín. Retrieved from www.bdigital.unal.edu.co/125/9/54_-_8_Capi_8.pdf
- Ludeña, C., de Miguel, C., & Schuschny, A. (2015). Cambio climático y mercados de carbono: repercusiones para los países en desarrollo. *Revista CEPAL*. Retrieved from <http://repositorio.cepal.org/handle/11362/38794>
- MINAMBIENTE. (n.d.). REDD+ Conozca qué es el Mercado Voluntario de Carbono - Redd+ | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Retrieved February 1, 2017, from <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/436-plantilla-bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistematicos-29>
- Ministerio de Ambiente, V. y D. T. (2003). Metodología para la valoración económica de bienes, servicios ambientales y recursos naturales., 52. Retrieved from http://www.crautonomia.gov.co/normasambiental/Economia-ambiental/Res_1478_de_2003.pdf
- Mora, E., Angulo, H. R., & Lezama, A. T. (2009). Análisis de las tasas de crecimiento diametral por grupos funcionales de especies arbóreas en un bosque tropical semi-decídúo de Venezuela. *Revista Forestal Venezolana*, 53(1), 23–31.
- Orrego, S. A., del Valle, J. I., & Moreno, F. H. (2003). *Medición de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales Tropicales de Colombia: Contribuciones para la Mitigación del Cambio Climático*. Medellín.
- Pérez, J. (2015). Un grupo de expertos cuenta, uno por uno, los árboles de Medellín. Retrieved from <http://www.botanicomedellin.org/actualidad/noticias/ultimas-noticias/un-grupo-de-expertos-cuenta-uno-por-uno-los-arboles-de-medellin/>
- Pineda, E., Valdez, J. I., & Pérez, C. D. P. (2016). Crecimiento en diámetro y fenología de *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC. en Costa Grande, Guerrero, México, 26(4), 19–28. <https://doi.org/10.15174/au.2016.914>
- Ramírez Flores, N. F., Mendizábal Hernández, L. del C., & Alba Landa, J. (2012). Potencial de captura y almacenamiento de CO₂ en el valle de Perote. Estudio de caso - *Pinus cembroides*. *Foresta Veracruzana*, 14(1), 17–22.
- Restrepo Builes, L. N. (2001). *Zonificación forestal con énfasis en la captura de CO₂ para el departamento de Antioquia*. Universidad de Antioquia.
- Román, E., Marcano, H., Vicéns, I., Bortolamedi, G., & Lugo, A. (2005). El bosque del Parque Central de la urbanización El Paraíso: estructura, composición de especies y crecimiento de árboles. *Acta Científica*, 19(1–3), 73–81.
- Schlegel, B. (2001). Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde. *Simposio Internacional Medición Y Monitoreo de La Captura de*

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Carbono En Ecosistemas Forestales, 1–13. Retrieved from http://www.uach.cl/procarbono/pdf/simposio_carbono/45_schlegel.PDF

Secretaría de Medio Ambiente Medellín. (2018). *Base de datos SAU*. Medellín.

Universidad Nacional de Colombia, & AMVA. (2015). *Guía para el manejo del arbolado urbano en el valle de Aburrá*. (F. Moreno Hurtado & C. Hoyos Estrada, Eds.). Medellín.

Valenzuela, M. (2005). Indicador De Salud. *Ciencia Y Trabajo*, 22(7), 118–122.

Vaz Monteiro, M., Levnic, T., & Doick, K. J. (2017). Growth rates of common urban trees in five cities in Great Britain: A dendrochronological evaluation with an emphasis on the impact of climate. *Urban Forestry and Urban Greening*, 22, 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.01.003>

ANEXOS

Anexo 1. Formato de datos

Tesis de grado crecimiento de especies

Especie				CAP (cm)			Altura árbol (m)					
Fecha	Ubicación	Árbol ID	Altura CAP (cm)	1	2	3	Total	Base de copa	% Muerte de copa	Lugar árbol	Luz	Observaciones

Lugar árbol: PD (piso duro), ZV (zona verde)

Nombre de quien registró la información: Andrés Rodríguez Hurtado

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Anexo 2. Especies SAU

No.	Especies	Nombre común
1	<i>Bauhinia picta</i>	Casco de vaca
2	<i>Bulnesia arborea</i>	Guayacán, guayacán de bola
3	<i>Caesalpinia ebano</i>	Ébano
4	<i>Caesalpinia pluviosa</i>	Acacia amarilla
5	<i>Cariniana pyriformis</i>	Abarco
6	<i>Cedrela odorata</i>	Cedro
7	<i>Ceiba pentandra</i>	Ceiba
8	<i>Cojoba arborea</i>	Carbonero zorro
9	<i>Erythrina fusca</i>	Búcaro
10	<i>Erythrina poeppigiana</i>	Cámbulo
11	<i>Guaiacum officinale</i>	Guayacán, guayacán azul, lignun vitae
12	<i>Handroanthus chrysanthus</i>	Guayacán amarillo
13	<i>Lafoensia acuminata</i>	Guayacán de Manizales
14	<i>Swietenia macrophylla</i>	Caoba, palo santo
15	<i>Tabebuia rosea</i>	Guayacán rosado
16	<i>Zygia longifolia</i>	Suribio

Anexo 3. Información general del búcaro

Árbol ID	Municipio	Ubicación	Coordenadas						Lugar
			N			W			
B01	Envigado	Colegio La Salle	6	10	50,9	75	34	48,0	PD
B02	Envigado	Colegio La Salle	6	10	51,4	75	34	48,4	PD
B03	Medellín	San Lucas	6	10	51,5	75	34	17,9	ZV
B04	Medellín	San Lucas	6	10	52,9	75	34	19,1	ZV
B05	Medellín	San Lucas	6	10	51,9	75	34	19,6	ZV
B06	Medellín	Terminal del norte	6	16	52,7	75	34	19,9	PD
B07	Medellín	Terminal del norte	6	16	53,0	75	34	19,7	PD
B08	Medellín	Terminal del norte	6	16	54,8	75	34	18,7	ZV
B09	Medellín	Alfonso López	6	17	1,6	75	34	22,1	ZV
B10	Medellín	Planetario	6	16	8,2	75	33	56,0	PD
B11	Medellín	Planetario	6	16	8,3	75	33	55,7	PD
B12	Medellín	Jardín botánico - Explora	6	16	20,7	75	33	53,2	PD
B13	Medellín	Estación Aguacatala	6	11	41,0	75	34	51,7	ZV
B14	Medellín	Estación Aguacatala	6	11	41,3	75	34	50,8	ZV
B15	Medellín	Glorieta Aguacatala	6	11	42,9	75	34	47,2	ZV
B16	Medellín	Aguacatala	6	11	35,4	75	34	35,5	ZV
B17	Medellín	Laureles	6	14	20,5	75	35	52,5	ZV

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Árbol ID	Municipio	Ubicación	Coordenadas						Lugar
			N			W			
B18	Medellín	Laureles	6	14	19,9	75	35	52,4	ZV
B19	Medellín	Laureles	6	14	20,2	75	35	51,8	ZV
B20	Medellín	Laureles	6	14	20,3	75	35	51,5	ZV

Anexo 4. Información general del guayacán amarillo

Árbol ID	Municipio	Ubicación	Coordenadas						Lugar
			N			W			
G01	Envigado	Sede Zúñiga EIA	6	10	44,2	75	34	47,0	PD
G02	Envigado	Colegio La Salle	6	10	52,9	75	34	47,2	ZV
G03	Envigado	Colegio La Salle	6	10	53,0	75	34	46,9	PD
G04	Envigado	Colegio La Salle	6	10	52,7	75	34	46,7	ZV
G05	Medellín	Detrás Frontera	6	11	0,6	75	34	44,1	ZV
G06	Medellín	Detrás Frontera	6	11	1,6	75	34	43,0	ZV
G07	Medellín	Detrás Frontera	6	11	1,2	75	34	43,2	ZV
G08	Medellín	Detrás Frontera	6	11	0,7	75	34	43,3	ZV
G09	Medellín	Bomba Zeuss	6	11	8,3	75	34	41,9	ZV
G10	Medellín	Detrás Bomba Zeuss	6	11	4,4	75	34	37,0	ZV
G11	Medellín	Detrás Bomba Zeuss	6	11	4,0	75	34	37,0	ZV
G12	Medellín	Detrás Bomba Zeuss	6	11	4,1	75	34	37,3	ZV
G13	Medellín	Detrás Bomba Zeuss	6	11	4,6	75	34	36,4	ZV
G14	Medellín	Detrás Bomba Zeuss	6	11	5,2	75	34	37,3	ZV
G15	Medellín	Aguacatala – Santafé cc	6	11	41,0	75	34	34,9	ZV
G16	Medellín	Aguacatala – Santafé cc	6	11	40,9	75	34	35,1	PD
G17	Medellín	Aguacatala – Santafé cc	6	11	41,3	75	34	34,5	PD
G18	Medellín	Barrio Alfonso López	6	17	1,0	75	34	26,5	PD
G19	Medellín	Aguacatala – puente	6	11	35,6	75	34	37,0	ZV
G20	Medellín	Aguacatala – puente	6	11	35,5	75	34	35,5	ZV

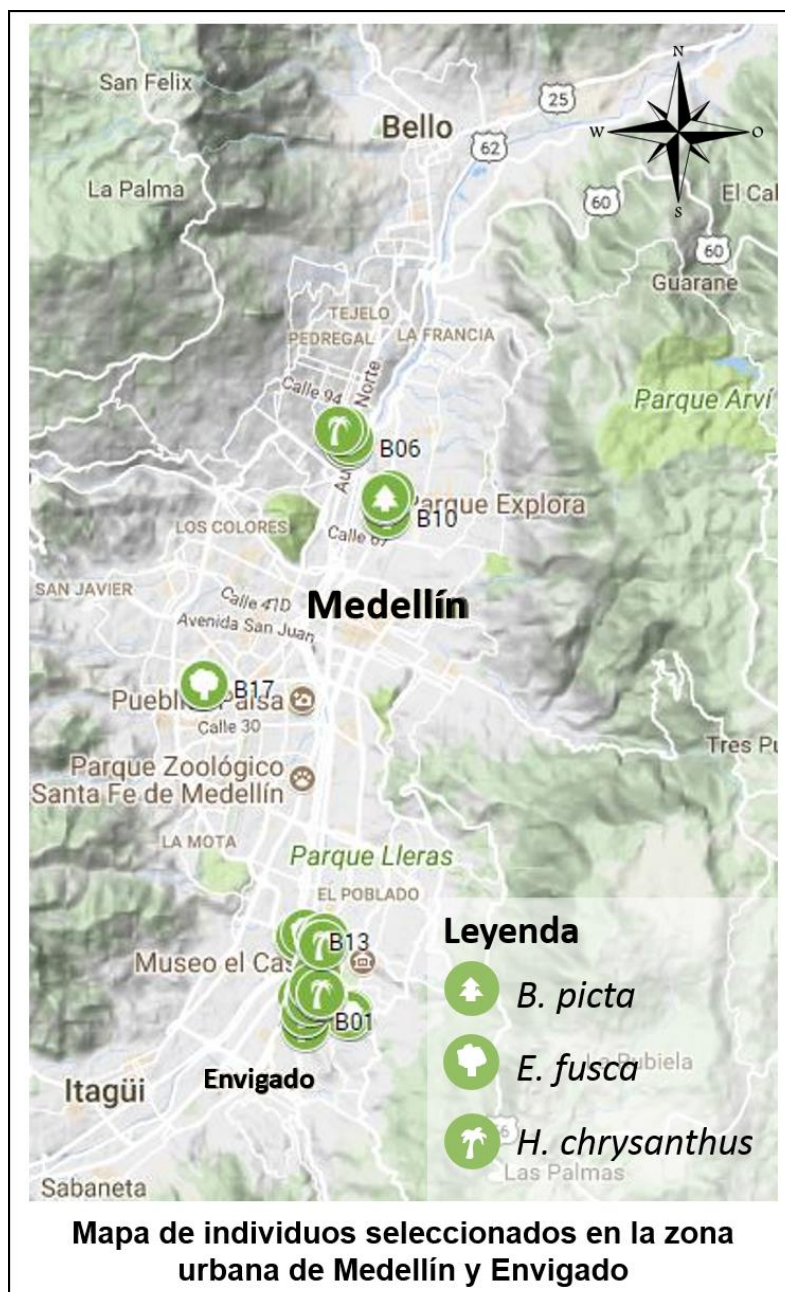
La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Anexo 5. Información general del casco de vaca

Árbol ID	Municipio	Ubicación	Coordenadas						Lugar
			N			W			
C01	Envigado	Colegio La Salle	6	10	50,9	75	34	48,1	ZV
C02	Envigado	Euro	6	10	59,2	75	34	47,3	ZV
C03	Medellín	Bomba de gasolina	6	11	5,9	75	34	39,2	ZV
C04	Envigado	Parroquia La Niña María	6	11	2,1	75	34	49,7	PD
C05	Medellín	Carulla de Sao Pablo	6	11	3,9	75	34	45,2	ZV
C06	Medellín	Bomba Zeuss	6	11	7,6	75	34	43,5	PD
C07	Medellín	Aguacatala - Frontera	6	11	21,8	75	34	38,8	ZV
C08	Medellín	Aguacatala - Frontera	6	11	20,4	75	34	39,1	ZV
C09	Medellín	Aguacatala - Frontera	6	11	20,9	75	34	39,1	ZV
C10	Medellín	Aguacatala - Frontera	6	11	20,0	75	34	39,4	ZV
C11	Medellín	Aguacatala - Frontera	6	11	20,0	75	34	39,4	PD
C12	Medellín	Aguacatala - Frontera	6	11	19,6	75	34	39,2	ZV
C13	Medellín	Aguacatala - Frontera	6	11	18,7	75	34	39,1	ZV
C14	Medellín	Aguacatala - Frontera	6	11	19,2	75	34	39,9	ZV
C15	Medellín	Aguacatala - Frontera	6	11	18,9	75	34	40,1	ZV
C16	Medellín	Aguacatala - Frontera	6	11	17,8	75	34	40,3	ZV
C17	Medellín	Casino - Aguacatala	6	11	39,7	75	34	38,7	ZV
C18	Medellín	Parque Explora	6	16	17,0	75	33	56,9	PD
C19	Medellín	Parque Explora	6	16	17,5	75	33	56,4	PD
C20	Medellín	Parque Explora	6	16	18,2	75	33	56,3	PD

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Anexo 6. Mapa de individuos seleccionados



Fuente: elaboración propia en Google Maps

Para consultar el mapa en línea, utilice el siguiente enlace: <https://goo.gl/rwLqCP>

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Anexo 7. Mediciones en campo - *Erythrina fusca*

Árbol ID	Altura CAP (m)	MEDICIONES CAP (cm)			Altura árbol (m)		% Muerte copa	Luz	Observaciones
		Jul - Ago 2017	Dic 2017	Mar 2018	Total	Base de copa			
B01	1,30	116,8	116,9	117,0	8,0	5,0	0,0	SI	Mucha protuberancia
B02	1,00	134,1	134,1	134,1	9,0	4,0	0,0	SI	-
B03	1,40	88,0	88,1	88,1	14,0	11,0	0,0	SI	Loma
B04	1,30	112,4	112,4	112,4	15,0	10,0	0,0	SI	Luz parcial (Bosque)
B05	1,30	180,0	179,1	179,1	17,0	11,0	0,0	SI	Tronco irregular en ladera
B06	1,30	144,5	145,5	145,5	8,0	2,5	0,0	SI	Sendero peatonal
B07	1,00	180,2	180,2	180,2	7,0	3,0	0,0	SI	Sendero peatonal
B08	1,00	263,4	263,4	263,4	14,0	5,0	0,0	SI	Zona de ladera
B09	1,30	161,8	161,8	162,2	13,0	4,0	0,0	SI	No mide hundimiento/deformación
B10	1,55	115,4	115,4	115,4	8,0	4,0	0,0	SI	Mucha protuberancia
B11	1,30	229,6	230,3	230,4	12,0	5,0	0,0	SI	Mucha protuberancia
B12	1,30	47,0	48,2	48,7	4,0	2,0	0,0	SI	Cerca de la bomba
B13	1,30	160,4	161,0	161,1	11,0	4,0	0,0	SI	Cerca del metro 2°
B14	1,30	153,0	153,0	153,2	12,0	4,0	0,0	SI	Cerca del metro 1°
B15	1,30	167,0	167,8	168,2	17,0	12,0	0,0	SI	Sendero peatonal- Glorieta
B16	1,00	219,4	216,2	216,2	16,0	4,0	0,0	SI	Tronco con espinas y helecho
B17	1,30	51,3	51,5	51,5	4,5	4,0	0,0	SI	Defoliación – tronco con espinas
B18	1,30	48,4	48,4	48,5	4,5	3,0	0,0	SI	Defoliación – tronco con espinas
B19	1,21	54,3	54,5	54,5	6,0	4,0	0,0	SI	Defoliación – tronco con espinas
B20	1,30	64,8	64,5	64,5	6,0	4,0	0,0	SI	Defoliación – tronco con espinas

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Anexo 8. Mediciones en campo - *Handroanthus chrysanthus*

Árbol ID	Altura CAP (m)	MEDICIONES CAP (cm)			Altura árbol (m)		% Muerte copa	Luz	Observaciones
		Jul - Ago 2017	Dic 2017	Mar 2018	Total	Base de copa			
G01	1,3	100,3	100,3	100,5	17,0	12,0	0,0	SI	-
G02	1,3	7,0	7,5	7,5	2,5	1,8	0,0	SI	Defoliación - poca luz por competencia
G03	1,3	171,6	171,7	172,0	20,0	9,0	0,0	SI	Tronco irregular
G04	1,3	109,6	109,6	110,5	18,0	6,0	0,0	SI	-
G05	1,3	61,5	62,1	62,5	8,0	4,0	0,0	SI	Defoliación - Luz parcialmente
G06	1,3	71,3	71,6	72,0	8,0	3,0	0,0	SI	Defoliación
G07	1,3	54,6	55,5	55,5	8,0	4,0	0,0	SI	Poca luz
G08	1,3	58,8	58,8	58,8	11,0	4,0	0,0	NO	Zona de sombra permanente
G09	1,0	73,4	73,4	73,4	15,0	5,0	0,0	SI	-
G10	1,3	30,5	30,5	30,5	6,0	4,0	0,0	NO	No recibe luz por competencia
G11	1,3	80,4	82,5	82,5	9,0	4,0	0,0	SI	Copa amplia
G12	1,3	47,1	47,3	47,5	6,0	4,0	0,0	SI	Luz parcialmente
G13	1,3	32,4	32,8	33,0	6,0	2,0	0,0	SI	Luz parcialmente
G14	1,3	53,5	54,5	54,6	10,0	5,0	0,0	SI	Copa amplia
G15	1,3	125,0	125,0	125,2	10,0	4,0	0,0	SI	-
G16	1,3	143,0	143,0	143,0	15,0	5,0	0,0	SI	-
G17	1,3	150,5	151,2	151,2	13,0	5,0	0,0	SI	-
G18	1,3	23,3	25,2	25,4	4,0	2,0	0,0	SI	-
G19	1,3	133,0	133,5	133,5	16,0	7,0	0,0	SI	-
G20	1,3	25,8	26,3	26,5	3,0	2,0	0,0	NO	Defoliación - Sombra

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Anexo 9. Mediciones en campo - *Bauhinia picta*

Árbol ID	Altura CAP (m)	MEDICIONES CAP (cm)			Altura árbol (m)		% Muerte copa	Luz	Observaciones
		Jul - Ago 2017	Dic 2017	Mar 2018	Total	Base de copa			
C01	1,3	55,3	57,4	58,4	8,00	3,00	0,0	SI	Sendero peatonal
C02	1,3	59,3	61,7	62,6	10,00	3,00	0,0	SI	Zona verde del Euro
C03	1,3	61,1	63,5	64,3	8,00	3,00	0,0	SI	Sendero peatonal
C04	1,0	127,6	127,6	128,4	14,00	2,00	0,0	SI	Iglesia detrás de la Av. Poblado
C05	1,3	117,0	118,0	119,3	15,00	2,00	0,0	SI	Entrada de Carulla sobre Av. Poblado
C06	1,3	104,0	105,0	105,3	12,00	3,00	0,0	SI	Poca luz
C07	1,3	66,4	69,0	70,7	10,00	1,00	0,0	SI	Campestre 1°
C08	1,3	40,0	42,0	42,7	6,00	1,00	0,0	SI	3°
C09	1,3	61,3	62,3	63,4	9,00	1,00	0,0	SI	2°
C10	1,3	42,1	44,5	45,4	8,00	2,00	0,0	SI	4°
C11	1,3	130,5	130,5	130,7	14,00	4,00	0,0	SI	Individuo adulto en sendero peatonal
C12	1,3	37,2	39,7	41,0	8,00	1,00	0,0	SI	6°
C13	1,3	49,5	51,5	53,0	7,00	1,00	0,0	SI	7°
C14	1,3	26,7	27,9	28,4	6,00	2,00	0,0	SI	8°
C15	1,0	22,9	24,6	25,4	6,00	1,00	0,0	SI	9°
C16	1,3	145,7	145,8	145,9	14,00	4,00	0,0	SI	10°
C17	1,3	64,6	66,1	67,5	5,00	2,50	0,0	SI	Sendero peatonal - muy frondoso
C18	1,3	40,0	42,1	42,4	3,50	1,00	0,0	SI	1° metro - Parque Norte
C19	1,3	60,3	62,0	63,8	5,00	2,00	0,0	SI	2° metro - Parque Norte
C20	1,0	68,4	70,6	73,0	6,00	2,00	0,0	SI	3° metro - Parque Norte

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.